



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

(выпускная квалификационная работа)

На тему **Прогноз толщины льда**  
**на реке Ветлуга**

Исполнитель Дыкова Маргарита Андреевна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к.т.н., доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Викторова Наталья Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

к.т.н., доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович  
(фамилия, имя, отчество)

«13» 06 2022г.

Санкт-Петербург  
2022

## Содержание

Введение.....	3
1 Физико-географическая характеристика бассейна Верхней Волги.....	5
1.1 Рельеф .....	5
1.2 Климат .....	6
1.3 Почвы .....	8
1.4 Растительность .....	9
1.5 Характеристика гидрографической сети .....	9
1.6 Гидрологическая изученность .....	12
2 Долгосрочные прогнозы ледовых явлений с учетом характеристик атмосферных процессов .....	22
3 Краткосрочные прогнозы ледовых явлений .....	31
3.1 Процесс таяния и уменьшения прочности ледяного покрова .....	31
3.2 Прогноз уменьшения толщины и прочности ледяного покрова. ....	33
4 Исходные данные для прогнозов .....	39
5 Прогноз толщины льда.....	45
5.1 Построение прогностических зависимостей .....	45
Заключение .....	49
Список использованных источников .....	50
Приложение А – Графики хода среднесуточной температуры воздуха .....	51
Приложение Б – Зависимости толщины льда от суммы отрицательных температур воздуха .....	59

## Введение

Прогнозы толщины ледяного покрова имеют важное значение. Основным потребителем подобных прогнозов является транспортный сектор экономики. В России обширные территории расположены за северным полярным кругом, где сеть дорог редкая и во многих местах проехать можно только в зимний период, когда замерзают водные преграды и болота. В таких местах транспортное сообщение осуществляется по зимникам. Для обеспечения работы зимних дорог необходимо заблаговременное предсказание толщины ледяного покрова на пересекаемых реках.

Прогнозы толщины ледяного покрова имеют также значение для водного транспорта, так как в определенной степени они определяют сроки начала навигации, а также условия навигации в зимний период.

Существующие методы прогноза толщины льда базируются на различных принципах в зависимости от заблаговременности прогноза. При выпуске долгосрочных прогнозов в основном применяют методы, учитывающие характер синоптических процессов. В настоящей работе рассматриваются краткосрочные прогнозы, базирующиеся на прогнозе метеорологических условий (температуре воздуха).

Цель данной работы – разработка методики краткосрочного прогноза толщины льда.

Объектом исследования является бассейн реки Ветлуга. В частности, рассматривались данные семи постов, последовательно расположенных на реке.

Задачи работы:

- подготовить физико-географическое описание рассматриваемого бассейна;
- изучить применяемые методы прогнозирования толщины льда;

- собрать исходную гидрометеорологическую информацию по выбранным постам (сведения о толщине льда и снега) и метеорологическим станциям (сведения о температуре воздуха);

- разработать прогностические схемы прогнозов;

- выполнить серию поверочных прогнозов и оценить эффективность разработанной методики;

- проанализировать полученные результаты и выработать рекомендации по их использованию.

В основе разрабатываемых методик лежат физико-статистические методы.

## 1 Физико-географическая характеристика бассейна Верхней Волги

Бассейн реки Ветлуга в гидрографическом отношении относится к бассейну Верхней Волги. Верхневолжский бассейн располагается в пределах Русской равнины и протянулся с севера на юг и с запада на восток почти на тысячу километров.

В плане природных зон, северная часть бассейна расположена в лесной зоне, а южные часть – в лесостепной [1].

### 1.1 Рельеф

Рельеф бассейна нельзя, несмотря на его расположение на Русской равнине, назвать строго равнинным. Согласно классификации, разработанной М.В. Карадеевой, в бассейне выявлены три провинции рельефа: ледниковые холмистый и плоские равнины, водно-ледниковые и аллювиальные равнины, возвышенные равнины, расчлененные эрозионными образованиями.

Ледниково-холмистые равнины расположены на севере бассейна от Волги до Оки, а также в бассейне реки Москва и частично, в бассейне реки Клязьмы (левобережная часть бассейна). В северо-западной части этой провинции отмечены эрозионные формы рельефа, образованные при валдайском оледенении. В других частях бассейна эти формы сглажены за счет процессов денудации. Есть ряд бассейнов (Молога, Шексна), где рельеф представлен моренными возвышенностями в виде холмов и гряд, между которыми располагаются озера [1].

Самой приподнятой частью бассейна является Валдайская возвышенность, абсолютные отметки которой могут достигать 300 м над уровнем моря. Поверхность водосборной мелкохолмистая с не глубокими понижениями, которые заполняют озера. Наиболее крупные озера здесь приурочены к понижениям доледникового периода.

В северо-восточной части этой провинции рельеф представлен слабо-волнистыми заболоченными равнинами. В бассейне наблюдается активная эрозия, что приводит к тому, что склоны долин рек изрезаны оврагами и балками. Абсолютные отметки не превышают 210 метров.

Ко второй из перечисленных провинций относится Окско-Донская низменность, которую окружают Приволжская, Среднерусская и Смоленско-Московская возвышенности. Абсолютные отметки составляют на севере около 110 – 125 метров, в центре – 150 – 180 м БС. Рельеф сформирован работой ледника, которые образовал долина таких рек, как Мокша, Пра, Проня, Цна. Овражно-балочная сеть в этой части бассейне не развита.

Среднерусская и Приволжская возвышенности относятся к провинции расчлененных равнин, поверхность которых изрезано густой сетью оврагов. Длина оврагов может достигать нескольких километров, а глубина – 25 метром.

Территория подвергалась тектоническим нарушениям, вследствие чего в рельефе выражены увалистые и волнистые формы рельефа, а также ярусность. На территории также довольно хорошо развита сеть оврагов, например весь правый берег реки Сура изрезан балкам и оврагами, а левые обладает увалистыми ступенчатыми формами рельефа. В силу эрозионных процессов идет постоянное увеличение числа оврагов и из глубины. В немалой степени этому способствует антропогенная деятельность.

## 1.2 Климат

Климат территории определяется циркуляцией воздушных масс, приходящих в Атлантики, Арктики и с европейской территории, его можно отнести умеренно континентальному.

Летний период характеризуется умеренно теплой погодой, что вызвано западной атмосферной циркуляцией, приносящей циклоны с большим количеством осадков.

Зима достаточно холодная. В период с октября по май преобладает восточный перенос воздушных масс. Нередко наблюдается и меридиональная циркуляция, вызванная вторжением арктических воздушных масс.

Радиационный баланс составляет в среднем  $39 \text{ ккал/см}^2$ , что составляет около 40% суммарной радиации, которая уменьшается с юго-востока на северо-запад в зависимости от подстилающей поверхности бассейна. Максимальный приход солнечной радиации отмечен в летний месяцы (июнь). В зимний период радиационный баланс имеет отрицательный знак.

Температурный режим, в силу большой протяженности бассейна, различный. Среднегодовые температуры воздуха изменяются по территории от  $1.4$  до  $4.8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Изотермы среднегодовых температур направлены с северо-запада на юго-восток. Самым холодным месяцем в году является январь, когда среднемесячная температура может составлять минус  $9 - 14 \text{ }^\circ\text{C}$ . Наблюденные абсолютные минимумы были ниже  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Устойчивый переход температуры через ноль градусов весной происходит в начале апреля. В весенний период происходит довольно интенсивное нарастание температуры. Осенний переход происходит в конце октября на севере бассейна и начале ноября – на юге.

Зимний термический режим отличается наличием оттепелей. За зиму может наблюдаться до 30 суток с оттепелью. Иногда они затягиваются на одну – две декады.

Норма годовых осадков по территории составляет  $600 - 800 \text{ мм}$ . Большое количество осадков выпадает на северо-западе бассейна. Наименьшее количество выпадает на юге территории. В годовом разрезе большая часть осадков выпадет летом (в жидком виде). В зимний период, в силу частых оттепелей, осадки могут выпадать как в твердом, так и смешанном и жидком виде.

Максимальное наблюдаемое суточное количество осадков составляет около  $120 \text{ мм}$ . Такие осадки вероятны с июня по сентябрь. Средняя продолжительность ливневых осадков составляет около 5 часов. Наибольшая продолжительность осадков наблюдается зимой, в декабре – феврале.

Снежный покров на территории появляется в последних числах октября – начале ноября. Обычно первый снежный покров стаивает. Устойчивый снежный покров образуется в конце ноября – начале декабря. Наиболее ранний сроки установления снежного покрова отмечены на северо-востоке бассейна. В среднем снежный покров может достигать толщины около 30 см, в отдельные годы – до 65 см. Количество дней со снежным покровом составляет 150. Таяние снега происходит довольно интенсивно и определяется характером весны. Оно может длиться от двух до двенадцати дней. При возврате холодов снег может выпасть повторно. Снежный покров характеризуется высокой плотностью и большим запасом влаги.

Район характеризуется достаточно высокими значениями относительной влажности воздуха, которая в среднем составляет 80 – 88%. В течение суток ее значение не постоянно: утром и ночью значения выше, чем днем. В летний период амплитуда суточных колебаний влажности может достигать 40%.

Преобладающие направления ветра связаны с характером атмосферной циркуляции. В целом в году преобладают юго-западные и юго-восточные ветры. В летний период преобладают ветры северо-западного, северного и северо-восточного направлений. На направление ветра влияет характер рельефа. При пересеченной местности он может менять свое направление на обратное преобладающему. Средняя скорость ветра составляет 3 м/с. Сильные ветра, со скоростью более 15 м/с наблюдаются крайне редко

Глубина промерзания почвы колеблется от 50 до 160 см, что определяется не только механическим составом почвогрунтов, но также температурой воздуха, особенностями рельефа и другими факторами.

### 1.3 Почвы

Наиболее распространенными почвами на территории бассейна являются подзолистые и чернозем. В южных районах преобладают черноземы, а



также серые лесные оподзоленные почвы. В юго-западной части бассейна преобладают дернов-подзолистые, серые оподзоленные почвы. На юго-востоке – серые лесные и оподзоленный выщелоченный чернозем. На северо-западе самые распространенные – дерново-средне- и слабоподзолистые в сочетании с болотными и торфяно-подзолистыми почвами. На северо-востоке – дерново-подзолистые почвы. Механический состав почв разнообразен и представлен торфом, песчаником, суглинками, глиной и другими породами [1].

#### 1.4 Растительность

Как уже указывалось выше территория расположена в лесной и лесостепной зоне. В лесной зоне произрастают хвойные, широколиственные и смешанные леса. Состав растительного покрова подвергся изменению, причинами которого стали сельскохозяйственные мероприятия, пожары и другие виды человеческой деятельности. Лесные массивы на данной территории представлены локальными островками и занимают около 25%. В низменных частях бассейна, около водных объектов, преобладают сосновые леса, на открытых пространствах – травянистая растительность, на возвышенностях произрастают широколиственные и смешанные леса (береза, ясень, дуб, клен, ель, осина).

На равнинной части бассейна растительность представлена мелколиственными и сосновыми лесами.

В долинах крупных рек, таких как Волга, Ока и Клязьма, широкое распространение имеет луговая растительность, которая занимает около 10%. Довольно большой процент площадей занят сельскохозяйственными культурами (рожь, пшеница, лен, сахарная свекла, картофель и др.).

#### 1.5 Характеристика гидрографической сети

*Реки.* На территории бассейна Верхней Волги достаточно много водотоков – более 66500, длина которых превышает 10 км. Но в основном гидрографическая сеть представлены малыми реками. Гидрографическую сеть всего бассейна делят на 4 группы: 1) от истока реки Волги до Рыбинского водохранилища; от Рыбинского водохранилища до впадения р. Ока; бассейн реки Оки; от устья р. Оки до г. Чебоксары.

Форма речного бассейна р. Волги до Рыбинского водохранилища асимметричная, правобережная часть меньше левобережной. Густота речной сети составляет 0.5 км/км<sup>2</sup>. Долины реки имеют трапецеидальную вытянутую форму, величина вреза составляет около 40 метров. Реки имеют довольно широкие поймы, пойменные террасы ровные, изрезаны старицами. Глубина рек изменяется в очень значительных пределах. Донные отложения большинства рек представлены песком или песком с илом. Уклоны рек составляют от 0.3 до 1.2 ‰.

Бассейн р. Волги от Рыбинского водохранилища до впадения реки Ока также имеет асимметричную форму. Форма водосборов притоков Волги овальная или грушевидная. Поймы террасированные, ширина их может достигать 10 км. Глубина вреза рек может составлять до 40 м.

Общее направление течения р. Ока и ее бассейна – с запада на восток. Густота речной сети составляет 0.5 км/км<sup>2</sup>. Водосборы имеют асимметричную грушевидную форму. Долины рек трапецеидальные или ящикообразные. Максимальная ширина долин достигает 20 км. Уклоны рек составляют от 0.1 до 1.1 ‰.

Бассейн Волги от устья Оки до Чебоксар довольно узкий. Густота речной сети составляет 0.7 км/км<sup>2</sup>. Водосборы рек по форме такие же, как и на вышеописанных участках. Ширина поймы на реке Ветлуга может быть до 2 км. Поймы ровные, поросли лесом и частично заболочены. Мелкая гидрографическая сеть в летний период может пересыхать, а в зимний – перемерзать. Донные отложения представлены песком, а на перекатах – песком с включением гравия. Продольные профили рек вогнутые.

Озера. Рассматриваемая территория изобилует озерами, которых насчитывается более 24 тысяч. Площадь 44 самых крупных озер составляет более 10 км<sup>2</sup>. Однако распределение озер по территории бассейна не равномерное. В основном они сосредоточены на северо-западе, где проходит граница Валдайского оледенения, а также в тех местах, где распространены водорастворимые породы (известняки, доломиты и др.).

В центральной и южной частях бассейна большее распространения получили искусственные водоемы – пруды.

Сток рек значительно зарегулирован водохранилищами. Помимо водохранилищ волжского каскада (Горьковского, Чебоксарского, Иваньковского, Угличского, Рыбинского, Шекснинского), водохранилища созданы на реках Москва, Упа, Пахра и других.

Уровенный режим озер характеризуется весенним подъемом и понижением в летний и зимний периоды. Высота подъема колеблется от 60 см до 3 м и зависит от морфометрических характеристик водоема.

Максимальный уровень воды на водоемах наблюдается при вскрытии ото льда (апрель – май). Падение уровня происходит плавно, при отсутствии дождевых паводков оно может составлять около 5 – 10 см в сутки. В дождливые сезоны уровень может подниматься на 100 см. В зимний период колебания уровня воды незначительные. В целом за год амплитуда колебаний уровня составляет от 70 до 300 см.

Весенний переход температуры воды наблюдается в апреле. Максимальная температура воды может достигать 28 °С. В глубоких водоемах наблюдается гомотермия.

Появление первых ледовых явлений наблюдается в конце октября – начале ноября. Причем на озерах первые ледовые явления появляются раньше, чем на водотоках. Ледостав обычно устанавливается через 3 – 10 дней после первого появления ледовых явлений. Толщина льда составляет 30 – 50 см.

Средняя продолжительность ледостава на реках района составляет 160 – 190 дней. Вскрытие ледяного покрова начинается в середине апреля. Вскрытие водоемов наблюдается позже, чем водотоков.

## 1.6 Гидрологическая изученность

Список постов на реках и каналах Верхне-Волжского бассейна взята с электронного ресурсу [2]. В таблице 1.1 приведена информация о действующих гидрологических постах региона.

*Река Ветлуга – с. Кажирово.* Пост расположен в село Кажирово на левом берегу реки Ветлуга в 7 км ниже устья р.Лекма и в 5 км выше устья р. Яхшанга. Прилегающая территория представляет собой изрезанную оврагами равнину, всхолмленной в правобережной части и низменной, изобилующей болотами и старицами по левобережью. Склоны долины пологие, из супеси и суглинков, поросших лесом. Пойма двухсторонняя, шириной около 2 км, левобережная – луговая, с действующими притоками, правобережная – с луговой и кустарниковой растительностью, слабозаболочена. Русло реки прямолинейное, песчаное, заросшее водной растительностью. Средняя скорость течения реки на перекатах 5.5 – 7 км/час, на плесах – 1.5 – 3.5 км/час. Весной во время половодья скорость течения достигает местами 10 км/час. Ширина реки в межень до 120 м. Берега крутые, достигают абсолютной отметки до 4,5 м. В 400 м выше и в 300 м ниже имеются перекаты. На рисунке 1.1 представлен ход уровня по гидропосту Кажирово за 2021 и 2022 годы.

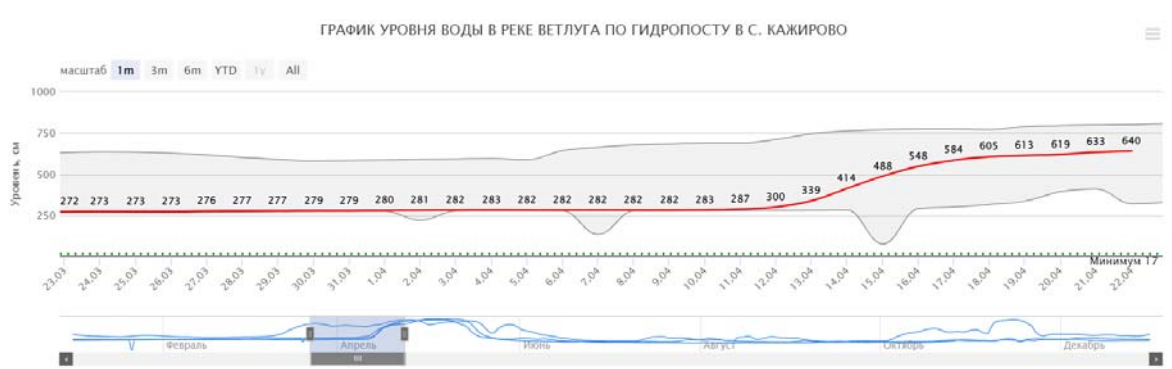


Рисунок 1.1 – График уровня воды в реке Ветлуга по гидропосту в с.Кажирово за 2021 и 2022 годы [1]

Таблица 1.1 – Действующие гидрологические посты сети Росгидромета по состоянию на начало 2022 г.

Название поста	Код водного объекта	Местоположение поста	Код поста	Широта точки (град., дес.доли град)	Долгота точки (град., дес.доли град)
Р.ФИЛИППОВКА - ФИЛИППОВО	111103389	Р.ФИЛИППОВКА	76603	58.3	50.48
Р.КЕРЖЕНЕЦ - ХАХАЛЫ	110003444	Р.КЕРЖЕНЕЦ	75608	56.65	44.66
Р.ПИЖМА - ПОКСТА	111103637	Р.ПИЖМА	76675	57.6	48.11
Р.ЧЕПЦА - ЦЕЛОУСЫ	111103234	Р.ЧЕПЦА	76676	58.46	50.85
Р.ШТЫРМА - ЧЕРНАЯ ПРОМЗА	110003689	Р.ШТЫРМА	75718	54.3	46.33
Р.МАЛЫЙ ЦИВИЛЬ - ШИГАЛИ	112100028	Р.МАЛЫЙ ЦИВИЛЬ	77115	55.68	47.48
Р.БЫСТРИЦА - ШИПИЦИНО	111103455	Р.БЫСТРИЦА	76614	58.46	49.25
Р.ЛУМПУН - ШМЫКИ	111103893	Р.ЛУМПУН	76637	57.35	51.33
Р.ВЯТКА - СЛОБОДСКОЙ	111102974	Р.ВЯТКА	76554	58.72	50.2
Р.ВЯТКА - СОВЕТСК	111102974	Р.ВЯТКА	76687	57.63	48.97
Р.СУНА - СУНА	111103798	Р.СУНА	76671	57.87	50.1
Р.БОЛЬШАЯ КАКША - СЯВА	110004212	Р.БОЛЬШАЯ КАКША	75687	58.01	46.35
Р.МОКША - ТЕМНИКОВ	110002676	Р.МОКША	75497	54.63	43.2
Р.ЛАПШАНГА - ТИМАРИХА	110004273	Р.ЛАПШАНГА	75692	57.53	44.78
Р.РУТКА - ТРИ РУТКИ	110004393	Р.РУТКА	75710	56.51	46.63
Р.ЧЕРНАЯ ХОЛУНИЦА - ТРОИЦА	111103043	Р.ЧЕРНАЯ ХОЛУНИЦА	76584	59.22	51.35
Р.ТЕША - АРЗАМАС	110003039	Р.ТЕША	75781	56.38	43.82
Р.АДАМКА - ГРАХОВО	111104060	Р.АДАМКА	76665	56.03	51.9
Р.СУРА - ПОРЕЦКОЕ	110003506	Р.СУРА	75627	55.18	46.35
Р.ЦИВИЛЬ - ТУВСИ	112100004	Р.ЦИВИЛЬ	77112	55.9	47.48

Продолжение таблицы 1.1

Название поста	Код водного объекта	Местоположение поста	Код поста	Широта точки (град., дес.доли град)	Долгота точки (град., дес.доли град)
Р.КОБРА - СИНЕГОРЬЕ	111103064	Р.КОБРА	76655	59.7	50.76
Р.МОЛОМА - СПАССКОЕ	111103497	Р.МОЛОМА	76620	58.68	48.31
Р.ЛЮНДА - КОПЫЛКОВО	110004373	Р.ЛЮНДА	75701	56.7	45.28
Р.КУДЬМА - КСТОВО	110003420	Р.КУДЬМА	75605	56.11	44.21
<b>Р.ВЕТЛУГА - ЧЕРНОВСКОЕ</b>	<b>110004056</b>	<b>Р.ВЕТЛУГА</b>	<b>75755</b>	<b>58.7</b>	<b>47.37</b>
Р.КАМА - АФАНАСЬЕВО	111100001	Р.КАМА	76697	58.85	53.08
Р.ЛЕТКА - СУХОБОРКА	111103160	Р.ЛЕТКА	76656	59.1	49.96
Р.САРОВКА - САРОВ	110002800	Р.САРОВКА	75777	54.92	43.33
Р.САТИС - САРОВ	110002795	Р.САТИС	75778	54.93	43.33
Р.САНИХТА - БУКАШЕВО	110001712	Р.САНИХТА	75300	56.76	43.13
Р.ЯРАНЬ - ПАЧИ	111103693	Р.ЯРАНЬ	76695	57.56	48.11
Р.ЯВАС - ЯВАС	110002857	Р.ЯВАС	75740	54.41	42.86
Р.ИНСАР - ЯЗЫКОВКА	110003825	Р.ИНСАР	75649	54.67	45.38
Р.СИВА - ГАВРИЛОВКА	111100932	Р.СИВА	76696	57.03	54.03
Р.ВЯТКА - НАГОРСК	111102974	Р.ВЯТКА	76553	59.31	50.76
Р.КАМА - ЛОЙНО	11100001	Р.КАМА	76700	59.73	52.65
Р.МОЛОМА - ПЕРМЯТСКОЕ	111103497	Р.МОЛОМА	76619	59.18	47.88
Р.ЮГ - ПОДОСИНОВЕЦ	103000996	Р.ЮГ	70153	60.26	47.06
Р.УРГА - ПОКРОВСКИЙ МАЙДАН	110004012	Р.УРГА	75664	55.95	45.8
Р.ЧЕПЦА - ПОЛОМ	111103234	Р.ЧЕПЦА	76596	56.8	53.23

Продолжение таблицы 1.1

Название поста	Код водного объекта	Местоположение поста	Код поста	Широта точки (град., дес.доли град)	Долгота точки (град., дес.доли град)
Р.ЛОБАНЬ - РЫБНАЯ ВАТАГА	111103968	Р.ЛОБАНЬ	76642	57.23	51.03
Р.БОЛЬШАЯ КОКШАГА - САНЧУРСК	112100051	Р.БОЛЬШАЯ КОКШАГА	77116	56.95	47.26
Р.КАМА - САРАПУЛ	111100001	Р.КАМА	76058	56.46	53.81
Р.СУНДОВИК - СЕМОВО	110003491	Р.СУНДОВИК	75615	55.96	44.83
Р.СИВИНЬ - СИВИНЬ	110002763	Р.СИВИНЬ	75505	54.35	44.25
Р.МАЛАЯ КОКШАГА - КУЯР	112100100	Р.МАЛАЯ КОКШАГА	77124	56.55	47.98
Р.СЕРЕЖА - ЛЕСУНОВО	110003070	Р.СЕРЕЖА	75540	55.67	43.12
Р.ПУШМА - ЛОДЕЙНОЕ	103001131	Р.ПУШМА	70163	60.18	47.33
Р.УРЖУМКА - ЛОПЬЯЛ	111103822	Р.УРЖУМКА	76628	56.95	49.98
Р.АЛАТЫРЬ - МАДАЕВО	110003778	Р.АЛАТЫРЬ	75645	54.8	44.5
Р.ТЕША - НАТАЛЬИНО	110003039	Р.ТЕША	75536	55.53	42.52
Р.ВОЯ - НОЛИНСК	111103788	Р.ВОЯ	76627	57.55	49.9
Р.НЫЛГА - НЫЛГА	111103921	Р.НЫЛГА	76640	56.78	52.43
Р.КЕРЖЕНЕЦ - ОГИБНОЕ	110003444	Р.КЕРЖЕНЕЦ	75607	57.08	44.58
Р.ИССА - ПАЕВО	110002730	Р.ИССА	75503	54.01	44.18
Р.БЕЛАЯ ХОЛУНИЦА - ИЛЬИНСКОЕ	111103200	Р.БЕЛАЯ ХОЛУНИЦА	76686	58.76	50.43
Р.ПЬЯНА - КАМКИНО	110003935	Р.ПЬЯНА	75658	55.53	45.21
Р.ВЯТКА - КИРС	111102974	Р.ВЯТКА	76551	59.31	52.18
Р.БЕЛАЯ ХОЛУНИЦА - КЛИМКОВКА	111103200	Р.БЕЛАЯ ХОЛУНИЦА	76594	58.88	51.23
Р.ВЯТКА - КОТЕЛЬНИЧ	111102974	Р.ВЯТКА	76557	58.3	48.35



Продолжение таблицы 1.1

Название поста	Код водного объекта	Местоположение поста	Код поста	Широта точки (град., дес.доли град)	Долгота точки (град., дес.доли град)
Р.ЛУЗА - КРАСАВИНО	103001169	Р.ЛУЗА	70169	60.71	47.6
Р.ВЯТКА - КРАСНОГЛИНЬЕ	111102974	Р.ВЯТКА	76550	58.8	52.41
Р.ИЛЕТЬ - КРАСНОГОРСКИЙ	112100152	Р.ИЛЕТЬ	77132	56.15	48.33
Р.НЕМДА - ВОРОБЬЕВА ГОРА	111103427	Р.НЕМДА	76674	57.37	49.13
Р.КИШМА - ВОРСМА	110003112	Р.КИШМА	75547	56.0	43.28
<b>Р.ВЕТЛУГА - ВОСКРЕСЕНСКОЕ</b>	<b>110004056</b>	<b>Р.ВЕТЛУГА</b>	<b>75680</b>	<b>56.83</b>	<b>45.45</b>
Р.ВЯТКА - ВЯТСКИЕ ПОЛЯНЫ	111102974	Р.ВЯТКА	76574	56.23	51.08
Р.ПЬЯНА - ГАГИНО	110003935	Р.ПЬЯНА	75656	55.23	45.05
Р.ЛОЙМИНА - ГЕОРГИЕВСКОЕ	110001701	Р.ЛОЙМИНА	75299	57.06	43.31
Р.ЧЕПЦА - ГЛАЗОВ	111103234	Р.ЧЕПЦА	76597	58.15	52.68
Р.ОКА - ГОРБАТОВ	110001755	Р.ОКА	75328	56.13	43.1
Р.УЗОЛА - ДЕРЖКОВО	110001723	Р.УЗОЛА	75301	56.85	43.65
Р.ЛОЗА - ИГРА	111103262	Р.ЛОЗА	76601	57.55	53.06
Р.ИЖМА - БОЛЬШИЕ ПОЛЯНЫ	110004348	Р.ИЖМА	75699	57.0	45.6
Р.ЮРОНГА - БОЛЬШОЕ ПОЛЕ	110004358	Р.ЮРОНГА	75727	56.91	45.96
Р.БОРОВКА - БОРОВКА	111103618	Р.БОРОВКА	76622	57.95	48.33
Р.ВАЛА - ВАВОЖ	111103908	Р.ВАЛА	76638	56.75	51.93
Р.ВЕТЛУГА - ВАРНАВИНО	110004056	Р.ВЕТЛУГА	75677	57.4	45.1
Р.ЛИНДА - ВАСИЛЬКОВО	110001738	Р.ЛИНДА	75303	56.53	44.1
Р.ВЕЛИКАЯ - ВЕЛИКОРЕЦКОЕ	111103420	Р.ВЕЛИКАЯ	76611	58.88	49.03

Продолжение таблицы 1.1

Название поста	Код водного объекта	Местоположение поста	Код поста	Широта точки (град., дес.доли град)	Долгота точки (град., дес.доли град)
<b>Р.ВЕТЛУГА - КАЖИРОВО</b>	<b>110004056</b>	<b>Р.ВЕТЛУГА</b>	<b>75676</b>	<b>57.85</b>	<b>45.8</b>
<b>Р.ВЕТЛУГА - ВЕТЛУЖСКИЙ</b>	<b>110004056</b>	<b>Р.ВЕТЛУГА</b>	<b>75678</b>	<b>57.18</b>	<b>45.13</b>
Р.КИЛЬМЕЗЬ - ВИЧМАРЬ	111103856	Р.КИЛЬМЕЗЬ	76634	56.96	51.01
Р.СВЯТИЦА - ВОГУЛЬЦЫ	111103347	Р.СВЯТИЦА	76602	58.05	51.66
Р.ВАД - АВДАЛОВО	110002825	Р.ВАД	75512	54.16	42.6
Р.СУРА - АЛАТЫРЬ	110003506	Р.СУРА	75625	54.85	46.6
Р.ВЯТКА - АРКУЛЬ	111102974	Р.ВЯТКА	76566	57.26	50.01
Р.СРЕДНИЙ АНИШ - БАЙГУЛОВО	112100148	Р.СРЕДНИЙ АНИШ	77130	55.81	47.96
Р.УСТА - БОЛЬШИЕ ОТАРЫ	110004304	Р.УСТА	75697	56.96	45.51
Р.АЛАТЫРЬ - ТУРГЕНЕВО	110003778	Р.АЛАТЫРЬ	75646	54.85	46.35

*Река Ветлуга-Михайловцы.* Пост располагается на полкилометра выше села, на левом берегу, в трех километрах ниже устья реки Белый Фердос. Территория, на которой создан пост, холмистая равнина. Ширина реки 2.5 – 3 км, долина неясна выражена, склоны пологие. Пойма двухсторонняя, сложена супесью и суглинками. Русло на участке поста прямолинейное, песчаное, заросшее растительностью по левому берегу. В 300 м ниже поста имеется пережат. На рисунке 1.2 представлен ход уровня по гидропосту Кажирово за 2021 и 2022

ГОДЫ.

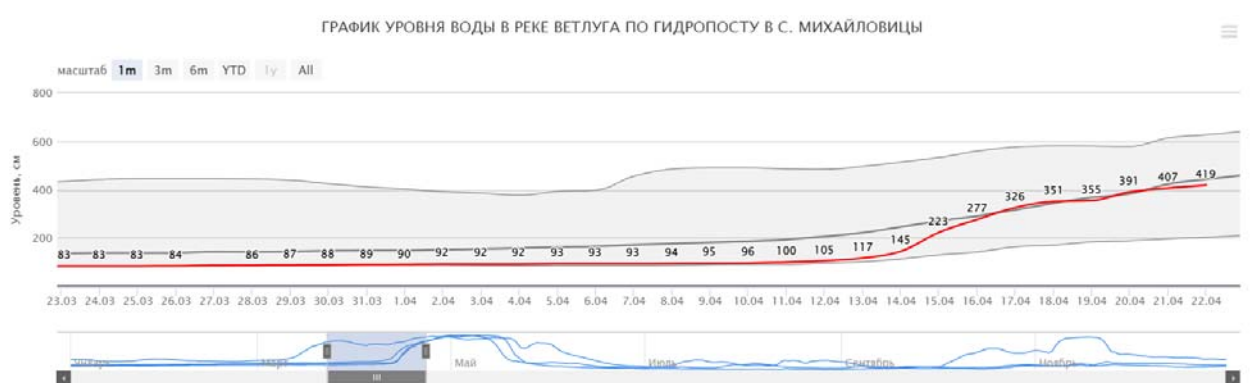


Рисунок. График уровня воды в реке Ветлуга по гидропосту в с. Михайловцы за 2021 и 2022 [1]

*Река Ветлуга – г. Шарья.* Пост расположен в 7 км к северо-западу от города Шарья, в 9 км выше устья реки Шарьинка. Прилегающая местность – волнистая равнина со смешанным лесом. Долина реки трапецеидальной формы, ассиметричная, шириной до 5 км. Правый склон долины крутой, высотой до 10 м, поросший хвойным лесом и кустарником, сложен в основном из песчаных пород. Пойма двухсторонняя, ширина правобережной до 1 км, сложена песком и суглинками, изрезана староречьями, левобережная шириной до 2 км, луговая, слабозаболоченная. В районе поста долина реки пересечена железной дорогой, проходящей в пойме по насыпи, высотой 8 - 10 метров, через русло по мосту.

В 200 метрах выше и 300 метрах ниже поста имеются пережаты. У железнодорожного моста и выше на крутом изгибе реки Ветлуга образуются заторы льда. При сплаве леса в 500 метрах выше поста образуются заломы леса.

*Река Ветлуга - г. Ветлуга.* Пост расположен у города в 500 м ниже устья р. Красница. Долина реки трапецеидальная, шириной до 10 км, высота правого склона 30 – 35 м, он крутой, рассечен оврагами, порос смешанным лесом, сложен суглинками; левый – пологий, сложен песками и суглинками. Пойма левобережная шириной до 4 км, частично заболочена, встречаются озера, сложена супесью и суглинками. Ниже поста на 390 м долина пересечена шоссейной дорогой, проходящей по насыпи, высотой 4 м.

Русло прямолинейное, слабдеформирующееся, песчаное. Выше поста при ледоходе образуются заторы, в осенне-зимний период ниже поста – зажоры.

*Река Ветлуга-Варнавино.* Пост располагается у поселка городского типа Варнавино, в 4 км ниже устья р. Осиновка. Местность холмистая равнина, поросшая смешанным лесом. Долина реки неясно выраженная. Правый склон крутой, рассечен оврагами и обрывами, глинистый, порос кустарником; левый – пологий, порос кустарником и смешанным лесом, сложен в основном песками.

Пойма двухсторонняя, на участке поста левобережная, шириной до 5 км, луговая – частично поросшая лесом, пересечена старицами, заболоченная, сложена песками и супесью.

Русло прямолинейное, песчаное, с илистыми отложениями. Берега: левый – пологий, правый – обрывистый, высотой до 5 м, поросли кустарниками.

В период ледохода ниже поста возникают заторы.

*Река Ветлуга-Ветлужский.* Пост располагается у пгт Ветлужский, на правом берегу р. Ветлуга, выше на 1 км устья реки Беленькая. Прилегающая местность – холмистая равнина, поросшая смешанным лесом и кустарниками.

Долина реки трапецеидальная, ассиметричная, шириной до 4 км. Правый склон долины крутой, высота до 40 м, сложен глинами, рассечен оврагами, левый – пологий, поросший смешанным лесом. Пойма на участке поста левобережная, шириной до 5 км, непересеченная, поросла кустарниками и смешанным лесом. Русло реки прямолинейное, песчаное, деформирующееся. Левый

берег пологий и песчаный, высотой до 4 м, правый – сливается со склоном долины. В 1 км ниже поста имеется пережат.

*Река Ветлуга-Воскресенское.* Пост расположен на южной окраине поселка городского типа, на правом берегу реки Ветлуга, в 5 км ниже устья реки Уста. Местность волнистая равнина, поросшая по левобережью смешанным лесом, по правому – распахана.

Долина реки трапецеидальная, ассиметричная, шириной до 6 км. Правый склон долины крутой, высота до 40 м, сложен глинами, рассечен оврагами, левый – пологий, поросший смешанным лесом. Пойма на участке поста левобережная, шириной до 6 км, пересечена старицами, поросла смешанным лесом.

## 2 Долгосрочные прогнозы ледовых явлений с учетом характеристик атмосферных процессов

Характеристики ледового покрова, сроки его появления зависят от многих факторов. В первую очередь от метеорологических, а также от географических особенностей территории. На сроки ледовых явлений влияют крупные процессы, которые происходят в атмосфере, так как они определяют погодные условия в том или ином районе. В связи с этим при долгосрочном прогнозировании в основе методик лежит учет общей атмосферной циркуляции.

Разработке любой методики обычно предшествует длительный подготовительный период. Во время этого периода для каждого конкретного объекта изучаются условия формирования и разрушения ледового покрова, факторы, которые влияют на него. Среди основных факторов исследуются особенности атмосферных процессов, причем не только в период наступления того или иного явления, а также в предшествующие и последующие периоды.

При рассмотрении атмосферных процессов их делят на синоптические периоды и сезоны либо по принципу сохранения в течение некоторого периода характера барического поля, либо по преобладанию длительного промежутка однородных процессов [3].

Прогноз сроков появления льда может осуществляться по формуле:

$$\Delta D = C_1 \Delta D_a + C_2 I \Delta p + C \quad (2.1)$$

где  $\Delta D$  – прогнозный срок появления льда в отклонениях от среднего многолетнего,

$C_1, C_2, C$  – коэффициенты, полученные эмпирическим путем,

$\Delta D_a$  – отклонение от средней многолетней даты начала формирования антициклона,

$I\Delta p$  – аномалии давления в рассматриваемый период в августе (т.е. предшествующий период начала появления льда).

В последнее время, в связи с улучшением доступности метеорологической информации, а также с развитием современной вычислительной техники, большое распространение получили синоптико-статистические методы, основанные на разложении метеорологических полей в ряд по ортогональным полиномам Чебышева, по естественным ортогональным функциям, по рядам Фурье и др.

В частности, применяется метода разложения по полиномам Чебышева. Пусть имеется поле метеоэлемента  $P$  в точках с координатами  $x$  и  $y$ :

$$\begin{aligned}x &= 0, 1, 2, 3, \dots, n \\y &= 0, 1, 2, 3, \dots, m.\end{aligned}$$

Значение элемента  $P$  можно представить в виде зависимостей от  $x$  и  $y$ :

$$P(x, y) = A_{00} + A_{10}\Psi_1(x)\Psi_0(y) + A_{01}\Psi_0(x)\Psi_1(y) + A_{11}\Psi_1(x)\Psi_1(y) + \dots + A_{ij}\Psi_i(x)\Psi_j(y). \quad (2.2)$$

Коэффициенты разложения  $A_{ij}$  можно определить по формуле:

$$A_{ij} = \frac{\sum_{x,y} P(x,y)\Psi_i(x)\Psi_j(y)}{\sum_x \Psi_i^2(x) \sum_y \Psi_j^2(y)} \quad (2.3)$$

где  $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_i$  – полиномы, которые заданы так, чтобы каждый коэффициент  $A_{ij}$  отражал определенное распределение значений  $P$ . На практике ограничиваются первыми 10 членами ряда.

При прогнозировании с применением естественных ортогональных функций, рассматривают совокупность последовательный по времени метео-

рологических полей посредством функций  $F(t, x)$ , где  $t$  – время, фиксированное для каждого индивидуального поля, а  $x$  – координаты,  $x = 1, 2, 3, \dots, n$ .  
 Функция  $F(t, x)$  задана в виде чисел:

$$\begin{cases} F_{1.1}, F_{1.2}, F_{1.3}, \dots, F_{1.n} \\ F_{2.1}, F_{2.2}, F_{2.3}, \dots, F_{2.n} \\ \dots \\ F_{i.1}, F_{i.2}, F_{i.3}, \dots, F_{i.n} \end{cases} \quad (2.4)$$

В этой формуле индексы соответствуют значениям переменных  $t$  и  $x$ .  
 Каждая строка в таблице характеризует в заданных точках состояние метеорологического поля в некоторый момент времени.

Затем делают разложение индивидуального поля из всей совокупности полей по функциям  $X_n(x)$  с коэффициентами  $B(t)$ , изменяющимися от одного поля к другому с течением времени от года к году, и находят такие функции  $X_n(x)$ , чтобы соблюдалось условие:

$$F(t, x) = \sum B_i(t) * X_n(x) \quad (2.5)$$

Функция  $X_n(x)$  имеет постоянное во времени распределение значений в пространстве или на плоскости, выбирается по данным совокупности полей, свойства и особенности которых определяют её индивидуальные характеристики. Функции  $X_n(x)$  называют собственными функциями совокупности полей или их естественными составляющими. С их помощью можно разложить в ряд поля аномалии давления в виде функции [3]:

$$P(x) = B_0 + B_1 * X_1(x) + B_2 * X_2(x) + \dots \quad (2.6)$$

где  $X_n(x)$  – естественные составляющие поля аномалии давлений;

$B_i$  – коэффициенты разложения, определяемые по формуле:



$$B_i = \frac{\sum_1^n P X_n(x)}{\sum X_n^2} \quad (2.7)$$

$i$  – индекс, соответствующий данному году,

$n$  – число точек поля, по которому ведется разложение.

В разложении число слагаемых равно числу точек поля, в которых определяются исходные данные. На практике сумма членов разложения быстро сходится, поэтому для описания поля ограничиваются первыми естественными составляющими. Преимущества таких разложений, при которых основная информация о состоянии поля во многих точках сосредоточена в небольшом числе слагаемых. Разложение полей по естественным ортогональным составляющим на практике проводят с использованием программных средств ПЭВМ.

При разложении по естественным ортогональным функциям полей аномалии давления  $\Delta P$  или среднего давления  $P$  у поверхности Земли, а также на уровне  $H_{500}$  и выше, около 80% информации о поле содержится в первых 5-6 слагаемых разложения поля.

При прогнозе для каждого рассматриваемого метеорологического элемента выявляются свои особенности структуры полей собственных функций  $X_n(x)$ , отличающихся значениями в разном положении и количестве очагов «+» и «-» значений естественных составляющих над рассматриваемой территорией. Это позволяет судить об особенностях циркуляции, отражаемых в каждой из составляющих поля.

Ледовые прогнозы делают разложением полей в рамках районов значительно меньших полусферы, для которых также можно применить разложение по полиномам Чебышева или по естественным ортогональным функциям. Если необходимо прогноз выстроить по метеорологическим элементам на всей полусфере, то применяют разложение полей в ряды Фурье или в ряды по сферическим функциям.

Еще одному синоптико-статистическому методу можно отнести множественную регрессию:

$$\hat{Y} - \bar{Y} = C_1(X_1 - \bar{X}_1) + C_2(X_2 - \bar{X}_2) + \dots + C_n(X_n - \bar{X}_n) \quad (2.8)$$

где  $C_1, C_2, \dots, C_n$  – коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов или их ещё называют коэффициенты регрессии.

Успешность применения регрессионных зависимостей зависит от качества выбора предикторов и объема выборки. Причем чем больше число предикторов, тем больший объем выборки необходим для разработки методики. Поэтому всегда встает вопрос выбора тех предикторов, которые являются наиболее информативными. Выбор предикторов может быть осуществлен с помощью пошаговой множественной линейной регрессии. Перебирая возможные предикторы, учитывают те из них, которые приводят к уменьшению квадратической погрешности прогнозирования.

Еще одним перспективным методом, который используется при разработке методик прогноза, является дискриминантный анализ. Он позволяет отобрать те факторы, которые самым тесным образом влияют на прогнозируемую величину. Например, появление льда на участке реки или районе разделяют на классы, затем во всех точках поля метеорологического элемента определяют расстояние между классами как разность средних значений. Выделяют наиболее информативные станции, где указанное расстояние наибольшее. Оно характеризуется соотношением:

$$\delta = d_i^2 / \sigma_i^2, \quad (2.9)$$

где  $d$  – расстояние между классами,

$\sigma$  – дисперсия по всей совокупности в  $i$ -той точке.

Решение задачи дискриминантного анализа состоит в решении уравнения:

$$(R^* - \lambda_s R)C_s = 0 \quad (2.10)$$

где  $R^*$  – матрица средних квадратических расстояний между классами,  $R$  – матрица средних квадратических расстояний по всех совокупности исходных данных.

Собственные значения  $\lambda_s$  и собственные вектора  $C_s$  будут являться решением уравнения (2.10). Если прогнозируемое явление разделено на два класса, используется только первый член разложения, соответствующий  $\lambda_{max}$ , если деление ведется на три класса, в расчет включают первые два члена разложения.

И регрессионный и дискриминантный анализ приводят к сжатию информации, отбору наиболее информативной. Недостатком этих методов является то, что при этом «формальном» подходе может потеряться физическая сущность происходящего процесса, что отразится на качестве прогнозов.

Определенную точность полученных зависимостей может обеспечить применение КПИ – коэффициента прогностической информативности. Для его вычисления сначала коэффициенты уравнения регрессии рассчитывают для ряда, из которого исключен один член (год), который рассматривается независимым, и по полученным данным для него составляется проверочный прогноз. Повторяя этот расчет для каждого члена ряда, получают ряд прогностических значений. Они коррелируются с фактическими значениями за те же годы, а коэффициент корреляции и есть КИП для данного уравнения.

Рассмотрим несколько примеров получения прогностических зависимостей. Как уже указывалось выше при долгосрочном прогнозе используются данные о предшествующих процессах на довольно обширном пространстве и за длительный промежуток времени. Например, чтобы прогнозировать даты появления льда в октябре, необходимо располагать информацией об атмосферных процессах за июль и август. Связь синоптических процессов июля и октября выявлена не случайно, она стала очевидной в результате исследования связи между аномалиями температуры отдельных месяцев. Поскольку степень

влияния термического состояния и характера атмосферной циркуляции вне одинаково по территории, что прогнозы делают территориальные. То есть для каждого района включают те предикторы, которые оказывают более существенное влияние.

Рассмотрим несколько примеров [3]. Например, для прогноза сроков появления льда на реках Обь и Иртыш используют уравнение:

$$\Delta D = C + C_1 V_1 + C_2 V_2 + \dots + C_{10} V_{10}, \quad (2.11)$$

где  $C_{1...10}$  – коэффициенты уравнения,

$V_{1...10}$  – коэффициенты разложения поля аномалии давления над Атлантическим океаном в июле.

Апробация уравнения (2.11) проводилась на протяжении длительного периода и доказала эффективность его использования с заблаговременностью в 1.5 месяца.

Для прогнозов сроков появления льда на Северной Двине используют уравнение:

$$\Delta D = C + C_1 V_1 + C_2 V_2 + C_3 V_3 + C_4 V_4 + C_5 V_{2/2} + C_6 V_{6/2} \quad (2.12)$$

где  $V_{2/2}$ ,  $V_{6/2}$  – коэффициенты парной корреляции, существенно влияющие на аномалии температуры воздуха и сроки появления льда на реке.

Подобные подходы используются и для прогноза сроков вскрытия рек. Вскрытие рек во многом определяется временем и интенсивность разрушения зимнего антициклона и мартовских фронтальных переносов.

В основу методики положено разложение Чебышева поля средних значений приземного давления. Так, например, прогностическое уравнение для реки Лены у п.Усть-Кут выглядит следующим образом:

$$\Delta D = 2,4 - 0,5 * A_{01} + 12,3 * A_{21} - 1,1 * \Delta \theta \quad (2.13)$$

где  $\Delta \theta$  – введена по данным метеостанции в г. Киренске.

Нередко применяют и разложение по ортогональным функциям. Например, раскладывают поля метеозадающих элементов за период, который предшествует вскрытию. Например, для Дона и Днепра – это данные за январь и февраль, а для Северной Двины и Печоры – за февраль и март.

Для прогноза вскрытия рек бассейна Дона выше Цимлянского водохранилища уравнение имеет вид:

$$\Delta D = 0,73B_2 - 0,9B_7 + 0,21B_9 - 0,35B_{10} - 0,85 \quad (2.14)$$

Для рек бассейна Днепра выше Киевского водохранилища:

$$\Delta D = -0,28B_4 - 1,33B_6 + 0,97B_7 - 1,00 \quad (2.15)$$

Для рек бассейна Северной Двины:

$$\Delta D = -0,26B_{2/2} + 0,22B_{3/2} + 1,29B_{7/2} - 1,31B_{8/2} + 0,56B_{3/3} - 1,7B_{10/3} - 1,25 \quad (2.16)$$

Верхние индексы при  $B$  обозначают порядковый номер коэффициента разложения, нижние индексы – порядковый номер месяца в году (2 – февраль, 3 – март).

На водохранилищах применяют те же методы, что и для водотоков. Так, уравнение прогноза сроков установления ледостава на волжских водохранилищах имеет вид:

$$\Delta D = C + C_1B_1 + C_2B_2 + C_3B_3 + C_4B_4 + C_5B_9. \quad (2.17)$$

Для организации навигации по Волге, помимо сроков наступления ледовых явлений, имеет важное значение и предсказывание толщины льда. Срок наступления той или иной толщины льда хорошо коррелируют со сроками начала ледостава, что позволяет, используя их связь осуществлять надежный прогноз.

Еще одним важным элементом является прогноз разрушения и очищения ото льда водохранилищ. Прогнозы этих элементов осуществляются на основе регрессионных уравнений, связывающих даты с максимальной наблюдаемой толщиной и суммой превышений температуры.

Для прогнозов сроков уменьшения прочности ледяного покрова до заданных характеристик и очищения водохранилищ применяют синоптико-статистический метод.

### 3 Краткосрочные прогнозы ледовых явлений

#### 3.1 Процесс таяния и уменьшения прочности ледяного покрова

Заблаговременное знание сроков наступления ледовых явлений, характера изменений толщины льда необходимы при оценке ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения, для обеспечения работы ледовых переправ, для обеспечения навигации, для определения сроков окончания работ на льду и со льда рек, озер и водохранилищ в весеннее время.

К основным характеристикам ледового покрова относят его толщину и относительное разрушающее напряжение на изгиб.

Лед в течение зимы под действием атмосферных процессов претерпевает изменения. Наиболее существенные, конечно, наблюдаются в весенний период, когда повышается температура воздуха и возрастает приток солнечной радиации. В зимний период напряжение на изгиб можно определять по толщине льда. Однако весной, когда происходит образование жидкой фазы во льду, сведений о толщине льда уже недостаточно. Измерение этой характеристики не входит в число стандартных гидрометеорологических наблюдений, поэтому ее определение производится в основном расчетными методами.

Таяние ледяного покрова происходит в дневной (верхней) и ниже его поверхностей. Интенсивность таяния зависит от многих факторов, таких как скорость течения, наличие снежного покрова на льду. В силу этих факторов таяние льда происходит неравномерно, что приводит к появлению промоин.

Вследствие поглощения ледяным покровом солнечной радиации в льду происходит таяние кристаллов и появление жидкой фазы, что влияет на прочностные характеристики льда.

Именно эти процессы и легли в основу схемы процесса таяния льда, разработанной Будатовым С.Н. [2]

Исходя из этой схемы процесса таяния ледяного покрова, С.Н. Блатов разработал метод расчета прочности таяния ледяного покрова. По этому методу прочность тающего ледяного покрова оценивается относительным разрушающим напряжением льда на изгиб  $\varphi$ , которое определяется по уравнению

$$\varphi = \frac{R}{R_0} = (1 - \sqrt{S/S_0}) \quad (3.1)$$

где  $R$  – разрушающее напряжение на изгиб для тающего льда;

$R_0$  – то же для льда при температуре  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , не подвергающегося воздействию солнечной радиации;

$S$  – содержание жидкой фазы во льду, выраженное количеством тепла, затраченного на ее образование;

$S_0$  – предельное количество поглощенного ледяным покровом тепла при полной потере прочности льда.

Величина  $S_0$  выражает то количество тепла, которое необходимо образования предельного количества жидкой фазы во льду. Она зависит от вида льда, его структуры, и изменяется в диапазоне от  $67\text{ Дж/см}^3$  до  $230\text{ Дж/см}^3$ . На практике применяется осредненное значение, равное  $184\text{ Дж/см}^3$ .

Расчет по схеме Булатова включает последовательное посуточное определение величины стаивания с верхней и нижней границ льда, а также определение количества жидкой фазы.

Расчет начинается с того момента, когда со льда сходит снежный покров. Это связано с тем, что снежный покров хороший теплоизолятор и препятствует прямому теплообмену ледяного покрова с атмосферой [6].



### 3.2 Прогноз уменьшения толщины и прочности ледяного покрова.

В основе методики расчета и прогноза лежит уравнение теплового баланса:

$$335h_c\rho_c = \sum_1^n(LE + P + I_\ominus + q_s)_{\text{дн}} + \sum_1^n(LE + P + I_\ominus)_{\text{н}}. \quad (3.2)$$

Левая часть этого уравнения показывает то количество тепла, которое необходимо для таяния ледяного покрова. А правая часть отражает суммарный теплообмен в течение суток (раздельно днем и ночью). Обычно расчет по уравнению (3.2) ведется последовательно по полусуткам. Расчет прекращается, когда правая и левая часть уравнения становятся равными [3].

Стаивание льда снизу зависит от теплопритока от грунта дна, притока тепла с грунтовыми водами, а также от солнечной радиации, которая проникает в толщу льда. Часть этой радиации адсорбируется льдом, что приводит к возникновению жидкой фазы.

Исходя из уравнения теплового баланса можно выразить величину  $S$ , которая выражается количеством тепла, поглощенным льдом, и теплом, затраченным на таяние его с верхней и нижней поверхности, отнесенной к оставшейся толщине льда:

$$S = \frac{\sum_1^n(LE+P+I_\ominus+q_s+q_b)_{\text{дн}}-335\rho_c+\sum_1^n(LE+P+I_\ominus)_{\text{н}}}{h_0+\sum_1^n(\Delta h'+\Delta h'')}. \quad (3.3)$$

где  $\Delta h$  — слой стаивания с верхней и нижней поверхностей ледяного покрова;

$h_0$  — начальная толщина льда;

$q_v$  – приток тепла к нижней границе ледяного покрова от грунта дна, подземных вод и проникающей через лед солнечной радиации.

Уравнение (3.3) лежит в основе методик краткосрочного прогноза. Исходными данным являются прогнозы температуры воздуха, скорости ветра, нижней и общей облачности, влажности воздуха.

Другая подобная методика базируется на следующих положениях.

Толщина ледяного покрова существенно изменяется как во времени, так и по акватории водоема и зависит от [7]:

1) разницы сроков образования ледяного покрова по площади, связанной с различиями по площади скоростей течения, глубин' и метеорологических условий;

2) условий образования льда, приводящих к образованию его нагромождений, шуги подо льдом и т. п.;

3) изменения во времени метеорологических условий и хода накопления снежного покрова на льду и переноса снега ветром;

4) образования снежного льда, наледей и др.

Условие нарастания ледяного покрова снизу можно выразить следующим неравенством:

$$B_{л} > C_{л}, \quad (3.4)$$

где  $B_{л}$  –тепловой поток в атмосферу от верхней поверхности снежно-ледяного покрова;

$C_{л}$  – приток тепла к нижней поверхности льда.

Тепловой поток в атмосферу может быть определен по формуле:

$$B_{л} = k_{л} (\vartheta_{п} - \theta_2) + d_{л} \quad (3.5)$$

где  $\theta_2$  – температура воздуха на высоте 2 м;

коэффициент теплообмена рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{л}} = (LE - LE') + P + (I\varepsilon - \Gamma'\varepsilon) / (\vartheta_{\text{п}} - \theta_2) \quad (3.6)$$

$\vartheta_{\text{п}}$  – температура поверхности снежного покрова на льду или льда при отсутствии снега;

$d_{\text{л}}$  – удельная теплоотдача поверхности снежно-ледяного покрова при  $\theta_2 = \vartheta_{\text{п}}$ .

Температура поверхности снежного покрова на льду рассчитывается по формуле

$$\vartheta_{\text{п}} = \frac{k_{\text{л}}\theta_2 + d_{\text{л}}}{\frac{\lambda_{\text{л}}}{h_{\text{л}} + \frac{\lambda_{\text{л}}}{\lambda_{\text{с}}}} + b_{\text{л}}}, \quad (3.7)$$

температура поверхности льда определяется по формуле:

$$\vartheta_{\text{пл}} = \frac{k_{\text{л}}\theta_2 + d_{\text{л}}}{\frac{\lambda_{\text{л}}}{h_{\text{л}}} + b_{\text{л}}}. \quad (3.8)$$

В уравнениях (3.7) и (3.8)  $h_{\text{л}}$ ,  $h_{\text{с}}$  – соответственно толщина льда и высота снега на льду;  $\lambda_{\text{л}}$ ,  $\lambda_{\text{с}}$  – коэффициент теплопроводности льда и снега.

Приток тепла к нижней поверхности определяется по формуле:

$$C_{\text{л}} = \alpha(\vartheta - \vartheta_{\text{нл}}) = \alpha\vartheta, \quad (3.9)$$

где  $\vartheta$  – температура воды, средняя по глубине;

$\vartheta_{\text{нл}}$  – температура нижней поверхности льда;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи водной массы, Вт/(м<sup>2</sup> \* °С);

$$\alpha = (320.6 - 9.61 \lg(g\beta h/v^2 * 106)) v^2 c_p * 10^{-6} \quad (3.10)$$

- где  $v$  – средняя скорость течения, м/с;  
 $c_p$  – объемная теплоемкость воды, Дж/(м<sup>3</sup>\*°С);  
 $h$  – глубина потока, м;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $\beta$  – относительное уменьшение объема воды при изменении температуры от 0 °С до данного значения

Для определения  $\alpha$  обычно используют эмпирические формулы следующего типа:

$$\alpha = 1210v. \quad (3.11)$$

Величину нарастания льда с нижней поверхности можно рассчитать по формуле:

$$\Delta h_{\text{л}} = \frac{\sum_1^t B_{\text{ли}} - \sum_1^t C_{\text{ли}}}{L_{\text{л}} \rho_{\text{л}}}. \quad (3.8)$$

$$\Delta h_{\text{л}} = (\sum 1t \text{ В ли} - \sum 1t \text{ С ли} / L_{\text{л}} \rho_{\text{л}}) \quad (3.12)$$

- где  $L$  – удельная теплота ледообразования, Дж/кг;  
 $\rho_{\text{л}}$  – плотность льда, кг/м<sup>3</sup>.

В практике прогнозов используют не только теоретические формулы, представленные выше, но и эмпирические формулы. Выбор той или иной формулы определяется наличием исходной гидрометеорологической информации. В таблице 3.1 приведены существующие эмпирические формулы и рекомендации по их использованию. Следует иметь в виду, что использование теор-

ретических формул требуют большого количества исходной информации, которая не всегда есть в наличии. Поэтому на практике предпочтение отдается эмпирическим формулам.

Таблица 3.1 – Формулы для расчета и прогноза толщины льда

Условия ледостава	Расчетная формула	Компоненты формул
<b>Теоретические формулы</b>		
Отсутствие снежного льда, скопление шуги подо льдом, малый приток тепла от водной массы	$h_{л} = -\lambda_{л} / \lambda_{с} h_{с} + \sqrt{(h_{л0} + -\lambda_{л} / \lambda_{с} h_{с})^2 + 2\lambda_{л} / L_{л} \rho_{л} * 10^{-4t} \sum \vartheta_{п}}$	$h_{л0}$ – начальная толщина льда, м $h_{с}$ – высота снега на льду, м $\rho_{л}$ , $\rho_{с}$ – плотность снега и льда, кг/м <sup>3</sup> .
Малом приращении толщины льда $\Delta h_{л}$ по сравнению с $\Delta h_{л0}$ и отсутствии снега на льду	$\Delta h_{л} = 6.2 * 10^{-4} \sum \vartheta_{п} / h_{л}$	$\Lambda_{с}$ = теплопроводность снега, Вт/(м * C <sup>0</sup> ) $\Lambda_{с} = 2.86 * 10^{-6} \rho_{с}^2$ - на реках
То же при наличии снега	$\Delta h_{л} = 6.2 * 10^{-4} \sum \vartheta_{п} / h_{э}$	$\Lambda_{с} = 3.77 * 10^{-6} \rho_{с}^2 + 2.9 * 10^{-2}$
При наличии скопленной шуги под ледяным покровом	$\Delta h_{л} = 6.2 * 10^{-4} \sum \vartheta_{п} / h_{п} / h_{э} (1 - \rho_{ш} / \rho_{л})$	$\Lambda_{л}$ – теплопроводность льда, Вт(м * C <sup>0</sup> ) $\Theta_{п}$ – температура поверхности снега(льда), определяется по тем-ре воздуха, скорости ветра и эквивалентной толщине льда
При условиях, типичных для Северо-Запада ЕТС (норм кол-во снега на шугу, шуги и др.)	$h_{л} = 2 * 10^{-2} \sqrt{\sum \theta_{-}}$ $\Delta h_{л} = \Delta (\sum \theta_{-}) (\sum \theta_{-})^{-0.5} * 10^{-2}$	

Продолжение таблицы 3.1

Условия ледостава	Расчетная формула	Компоненты формул
При учете высоты снега на льду и скоплений шуги подо льдом	$h_{\text{л}} = 10^{-2} ( 90n_{\text{л}}^2 + 9n_{\text{л}} ( 2.6 - a_0 ) + a_0 ) \sqrt{\sum \theta_{-}}$ $h_{\text{л}} = 10^{-2} ( \sum \theta_{-} )^0$	<p>T – интервал времени</p> <p><math>\sum \theta_{\text{п}}</math> – сумма средних суточных значений температуры поверхности снега</p> <p><math>H_{\text{э}}</math> – толщина льда, эквивалентная снежно-ледяному покрову :</p> $H_{\text{э}} = h_{\text{л}} + \lambda_{\text{л}} / \lambda_{\text{с}} * h_{\text{с}}$ <p><math>\rho_{\text{ш}}</math> – плотность шуги</p>

#### 4 Исходные данные для прогнозов

В работе рассматривается методика прогноза толщины льда на гидрологических постах, расположенных на реке Ветлуга. В таблице 4.1 приведены основные сведения по используемым постам. На рисунке 4.1 представлена схема расположения постов в бассейне. Как видно из таблицы 4.1 и рисунка 4.1, посты равномерно расположены по длине реки. Все посты в настоящее время действуют.

Река Ветлуга является притоком реки Волга, впадает в нее с правого берега перед Чебоксарским водохранилищем. Согласно гидрологической изученности [8], длина составляет 400 км, а площадь бассейна – 39 400 км<sup>2</sup>. На своем протяжении река протекает через территории Кировской, Костромской, Нижегородской областей, а также по территории республики Марий Эл.

Как видно из таблицы 4.1 водосбор имеет достаточно однородные характеристики: его озерность на всем протяжении составляет менее 1%, заболоченность не превышает 2%, залесенность колеблется в диапазоне 73 – 82%. Территория водосбора не подвергалась сильному антропогенному вмешательству, доля урбанизированных территорий не превышает 1%.

Река берет свое начало при слиянии рек Большой и Малой Быстрой в 2 км к востоку от с. Ивановское Кировской области. Впадает в р. Волга на удалении 2029 км от устья.

Бассейн реки располагается в пределах Унженско-Ветлужской равнины. Средняя ширина водосбора составляет 100 км, а наибольшая 170 км. По характеру рельефа его можно условно разделить на три части. Северная часть, включающая бассейн от истока до впадения р. Пыщуг, расположена в пределах Северных Увалов и представляет собой всхолмленную равнину. Центральная часть, включающая часть бассейна до впадения

реки Усты, представляет собой слабоволнистую равнину. А южная часть расположена на плоской, сильнозаболоченной, песчаной Мариинской низменности [1].

В основном в бассейне распространены подзолистые почвы, по механическому составу – песчаные и супесчаные. В пойме самой реки и ее притоков распространены дерновые и торфяно-болотные почвы.

Залесенность водосбора в целом составляет 70%. В северной и центральной частях произрастают смешанные и елово-пихтовые леса. Ниже впадения р. Усты растительный покров представлен сосновыми борами с примесью ели, березы, осины и других лиственных пород. На поймах произрастает луговая растительность. Общая озерность бассейна не превышает 1%, а заболоченность – 1%. Густота речной сети составляет 0.6 км/км<sup>2</sup>.



Рисунок 4.1 – Схема расположения гидрологических постов

Таблица 4.1 – Сведения по гидрологическим постам на р. Ветлуга

№ поста	Пост	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Озерность, %	Заболоченность, %	Лесистость, %	Доля урбанизированных территорий, %	Средняя высота водосбора, м
1	с. Кажирово	667	10300	–	–	–	–	–
2	с. Михайловицы	586	12600	0*	<1**	82	<1*	170
3	г. Шарья	519	14900	–	–	–	–	–
4	г. Ветлуга	392	22200	0*	<1**	82	<1*	155
5	пгт Варнавино	261	26800	–	–	–	–	–
6	пгт Ветлужский	228	27500	<1	2	73	1	150
7	пгт Воскресенское	164	34300	<1*	<1**	78	<1*	145

Примечания:  
 \* - по данным OpenStreetMaps  
 \*\* - по данным карты болот масштаба 1:1000000

Наблюдения за ледовым режимом начаты в конце 19 века одновременно с наблюдениями за уровнями воды. Однако измерения толщины льда были начаты значительно позже, в изданиях водного кадастра сведения приводятся с 1931 года.

Ледовый режим реки Ветлуги характеризуется следующими особенностями. Наибольшая интенсивность нарастания льда фиксируется в начале ледостава, когда лед не покрыт снегом или толщина последнего не очень значительная. В этот период нарастает примерно от 0.8 до 1.0 см в сутки. Максимальная наблюденная интенсивность нарастания льда составила 4 см в сутки. После того, как лед покроется снегом, лед нарастет с гораздо меньшей интенсивностью. Например, в январе она составляет 0.4 см в сутки, в феврале – 0.3 см в сутки, а марте может составлять 0.1 см в сутки. К середине марта рост толщины льда обычно прекращается. Если в марте и происходит нарастание толщины льда, то за счет замерзания талой воды поверх льда (наслуда).

Наибольшая толщина льда обычно фиксируется в марте. В многолетнем разрезе колебания толщины льда очень значительные: в холодные зимы толщина может в два раза превышать значения, зафиксированные в годы с теплой зимой. Отчетливой закономерности в распределении средних многолетних значений наибольшей толщины льда по территории не наблюдается.

Для разработки методики по всем указанным постам были собраны сведения о толщине льда и снега на льду за период с 1960 по 1989 год. Данные представляют собой результаты наблюдений, проводимых раз в 5 дней от начала ледостава до его окончания. Источником данные являлись гидрологические ежегодники [9].

Основным фактором, который определяет толщину льда, является температура воздуха. В связи с этим по территории бассейна были собраны данные ежедневных наблюдений по температуре воздуха по метеостанции Ветлуга. В работе использовались данные, представленные на официальном сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных [4].

Поскольку для разработки методики необходимы сведения о суммах отрицательных температур, то по данным всех лет строились хронологические графики температуры воздуха. Указанные графики, приведенные в Приложении А, использовались для определения дат устойчивого перехода температуры через ноль градусов.

## 5 Прогноз толщины льда

### 5.1 Построение прогностических зависимостей

В основу разрабатываемых методик положена эмпирическая зависимость толщина снега от суммы отрицательных температур.

Формулы вида  $h_{л} = f(\Sigma\Theta_-)$  обычно используются в начальный момент ледообразования, когда снег на льду отсутствует. Как правило эти зависимости нелинейные и представляют собой однотипные кривые параболической формы, описываемые уравнениями вида

$$h_{л} = a (\Sigma\Theta_-)^m, \quad (5.1)$$

где  $a$  и  $m$  – параметры степенной зависимости.

На первом этапе по всему имеющемуся массиву данных строились указанные зависимости. На рисунке 5.1 приведен пример подобной зависимости для гидрологического поста р. Ветлуга – д. Кажирово.

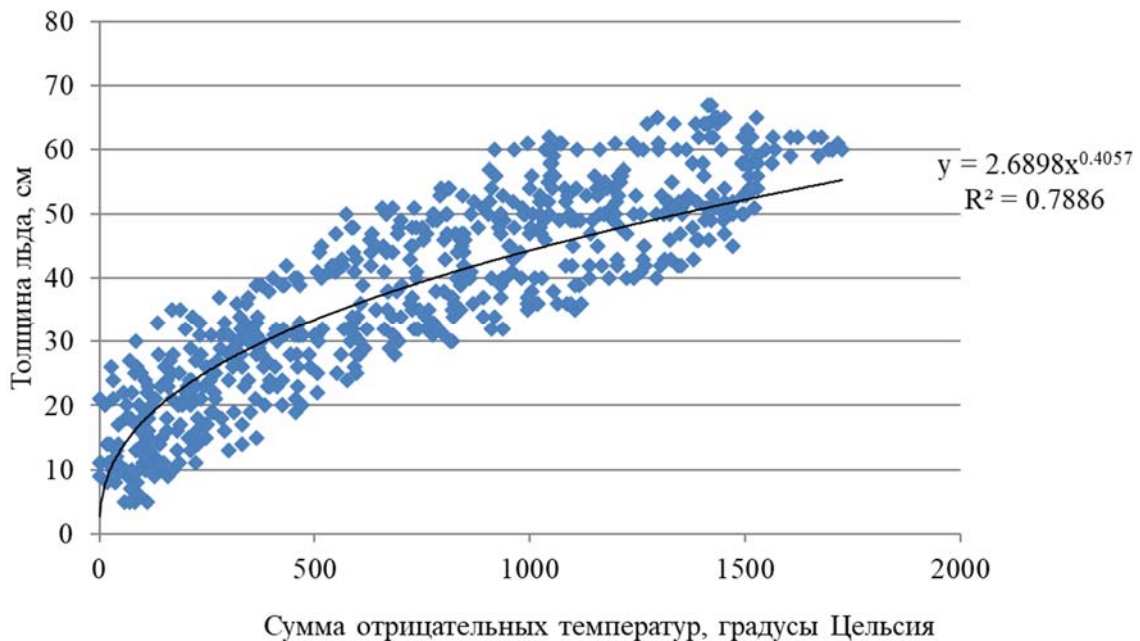


Рисунок 5.1 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta_-)^m$  для р. Ветлуга – д. Кажирово

В таблице 5.1 приведены полученные уравнения и оценка коэффициента детерминации.

Таблица 5.1 – Зависимости толщины льда от суммы отрицательных температур

Река - Пост	Вид зависимости	Коэффициент корреляции
с. Кажирово	$h_{л} = 2.6898(\Sigma\theta)^{0.4057}$	0.89
с. Михайловицы	$h_{л} = 1.5078(\Sigma\theta)^{0.4691}$	0.84
г. Шарья	$h_{л} = 2.1506(\Sigma\theta)^{0.4434}$	0.89
г. Ветлуга	$h_{л} = 1.7966(\Sigma\theta)^{0.4727}$	0.90
пгт Варнавино	$h_{л} = 3.864(\Sigma\theta)^{0.6253}$	0.79
пгт Ветлужский	$h_{л} = 3.0425(\Sigma\theta)^{0.402}$	0.91
пгт Воскресенское	$h_{л} = 5.9351(\Sigma\theta)^{0.3091}$	0.86

Как видно из таблицы 5.1 коэффициенты тесноты связи достаточно высокие, однако наблюдается достаточно большой разброс. Для анализа точек, которые выпадают из общей линии зависимости, были построены графики, на которых отдельным цветом были выделены данные за конкретные годы. Построенные зависимости представлены в Приложении Б. На рисунке 5.2 приведен вид подобного графика.

Полученные зависимости не являются однозначными, что связано с влиянием многих факторов: высоты снежного покрова на льду, интенсивности изменения температуры воздуха, влажности года. В связи с этим для более глубокого анализа была проведена оценка суровости зимы путем расчета средней температуры за октябрь – март. Полученные результаты сведены в таблицу 5.2.

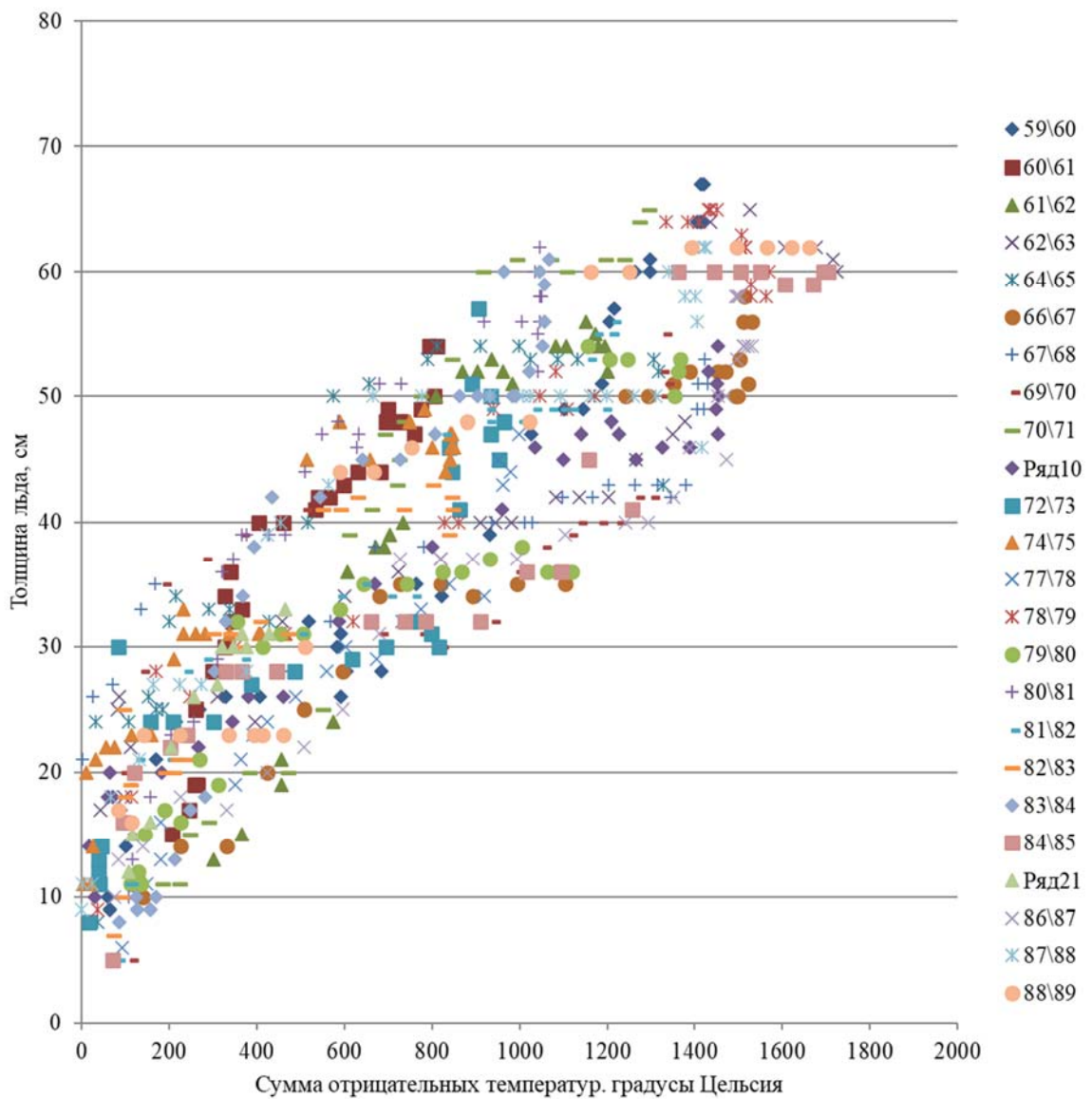


Рисунок 5.2 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – д. Кажирово (цветными маркерами выделены данные за конкретные годы)

Таблица 5.2 – Средняя температура за период с октября по март

Год	Средняя температура, °C	Год	Средняя температура, °C
1959/1960	-10.57	1974/1975	-3.43
1960/1961	-	1975/1976	-
1961/1962	-5.62	1976/1977	-
1962/1963	-8.86	1977/1978	-5.39
1963/1964	-	1978/1979	-8.15
1964/1965	-6.59	1979/1980	-7.05

Продолжение таблицы 5.2

Год	Средняя температура, °С		Год	Средняя температура, °С
1965/1966	-		1980/1981	-5.15
1966/1967	-7.96		1981/1982	-5.39
1967/1968	-6.47		1982/1983	-4.23
1968/1969	-10.57		1983/1984	-5.16
1969/1970	-7.09		1984/1985	-8.87
1970/1971	-6.52		1985/1986	-5.15
1971/1972	-7.81		1986/1987	-7.96
1972/1973	-5.22		1987/1988	-6.47
1973/1974	-		1988/1989	-10.57

Полученные зависимости были использованы для выпуска поверочных прогнозов толщины льда.



## Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были: рассмотрены существующие методы прогноза ледовых явлений (сроков их наступления и толщины ледяного покрова) с различной заблаговременностью, собрана и проанализированы исходные сведения о толщине ледяного и снежного покрова; обработана метеорологическая информация – рассчитаны суммы отрицательных температур воздуха; для семи постов на реке Ветлуга построены прогностические зависимости; проведена оценка полученных зависимостей.

Полученные прогностические зависимости в статистическом смысле удовлетворяют критерия – значение коэффициентов корреляции всех зависимостей более 0.7. Проведенные поверочные прогнозы не в полной мере оправдались.

## Список использованных источников

- 1 Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных вод. Том 10. Верхне-Волжский район. – Л.: Гидрометеиздат.
- 2 AllRivers.info – сервис ежедневного мониторинга уровня воды в водных объектах России и бывшего СССР. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://allrivers.info/region/russia/center> (дата обращения 10.02.2022)
- 3 Георгиевский В.Ю., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. – СПб, изд. РГГМУ, 2007. – 436 с.
- 4 Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ttr)». Электронный ресурс. Режим доступа: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=5> (дата обращения 11.11.2021)
- 5 Булатов С.Н. Расчет прочности тающего ледяного покрова и начала ветрового дрейфа льда. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 120 с.
- 6 Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 3. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 168 с.
- 7 Бефани Н.Ф., Калинин Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. – Л. : Гидрометеиздат. 1983.
- 8 Государственный водный кадастр. Гидрологическая изученность. Том 10. Верхне-Волжский район. – Л.: Гидрометеиздат.
- 9 Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Часть 1. Реки и каналы. Выпуск 23. Бассейн Волги (верхнее течение)

## Приложение А – Графики хода среднесуточной температуры воздуха

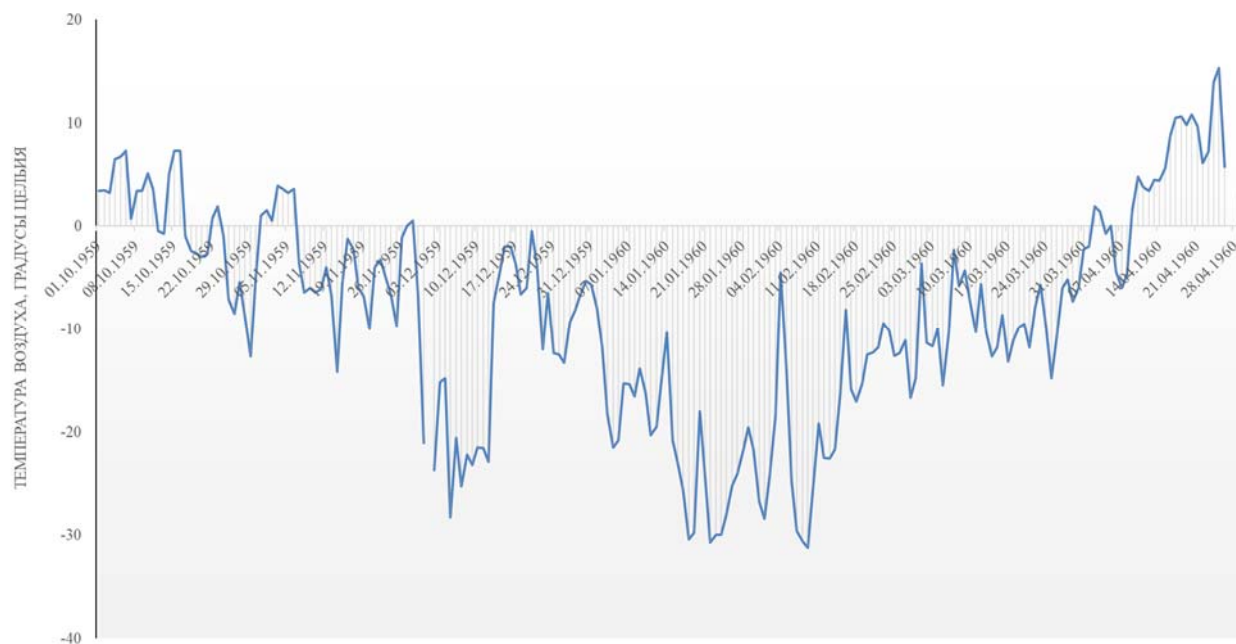


Рисунок А.1. – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1960 год

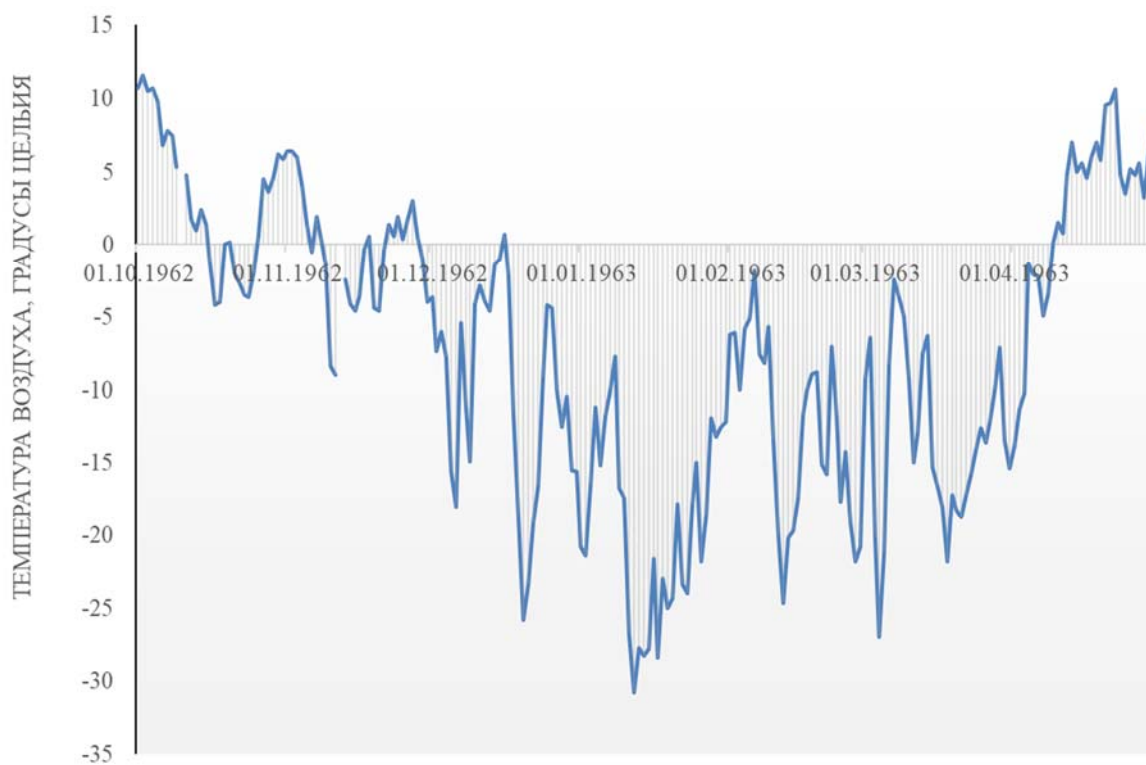


Рисунок А.2. – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1963 год

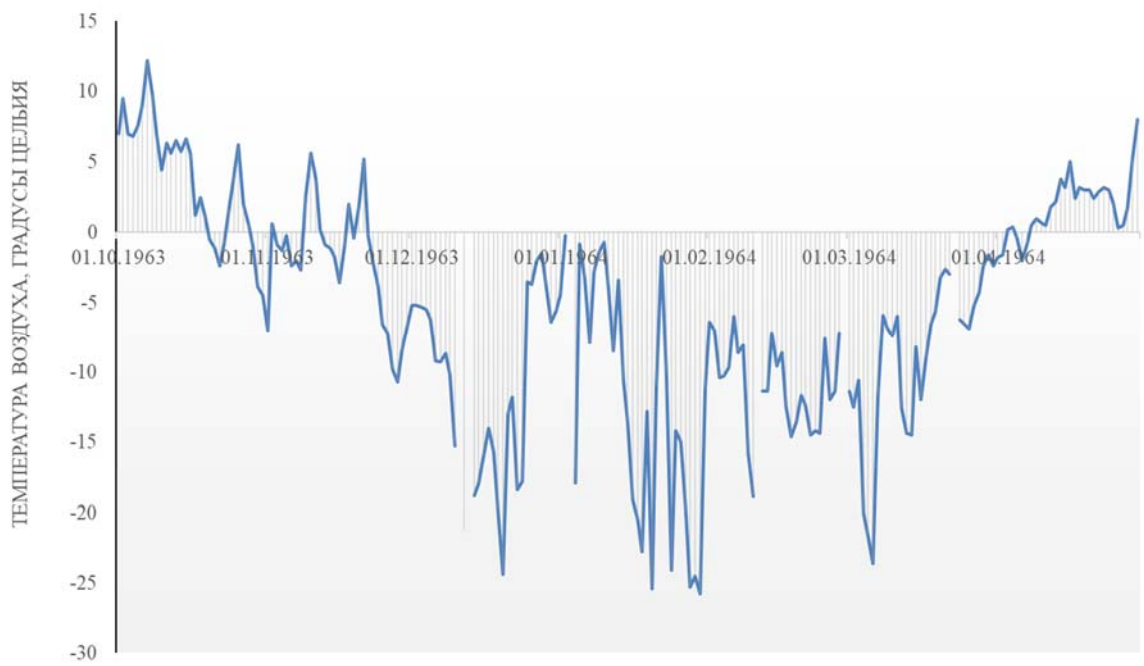


Рисунок А.3. – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1964 год

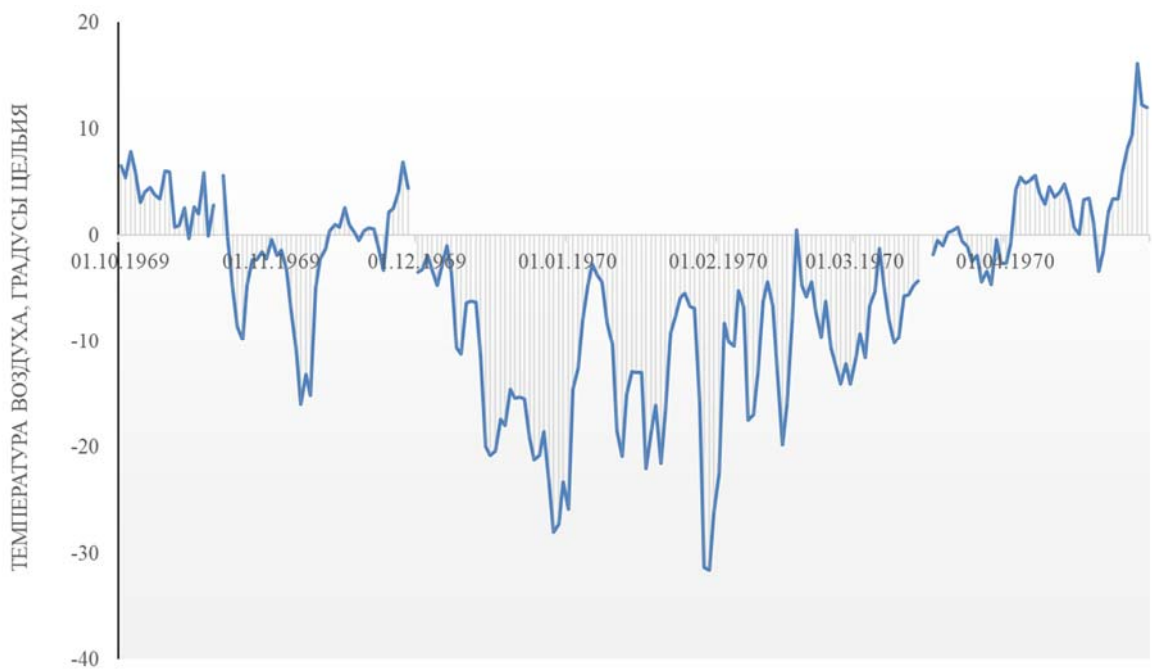


Рисунок А.4 – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1970 год

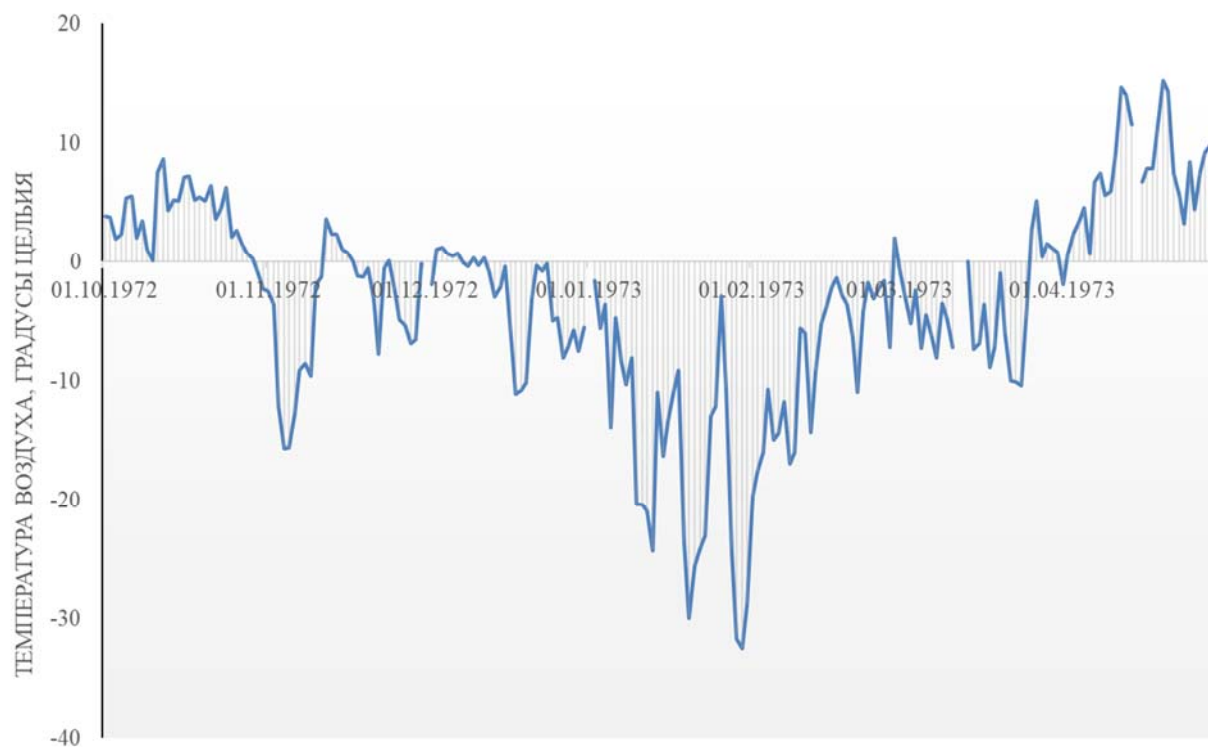


Рисунок А.5 – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1973 год

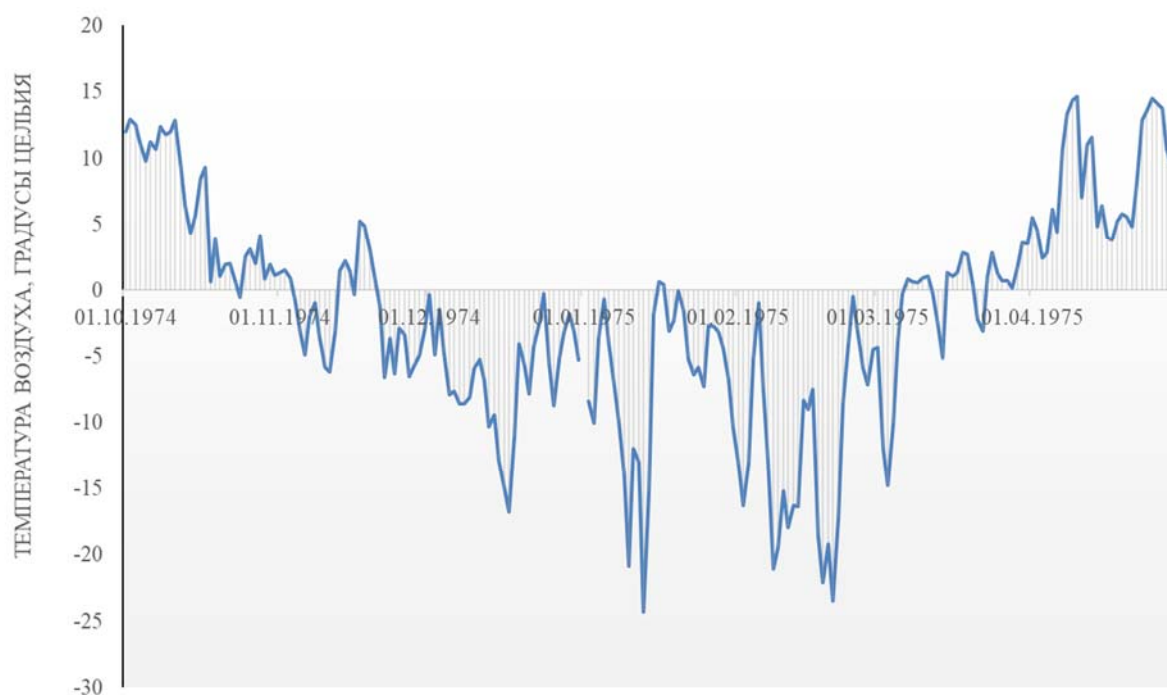


Рисунок А.6 – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1975 год

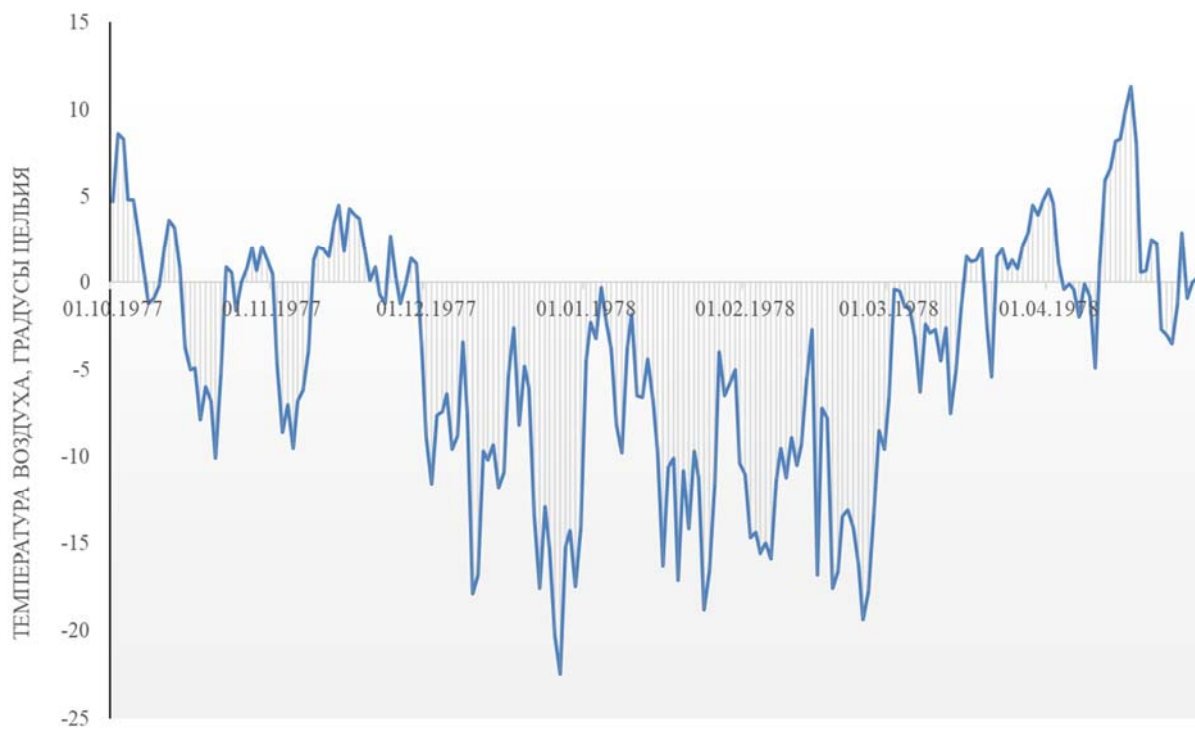


Рисунок А.7 – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1978 год

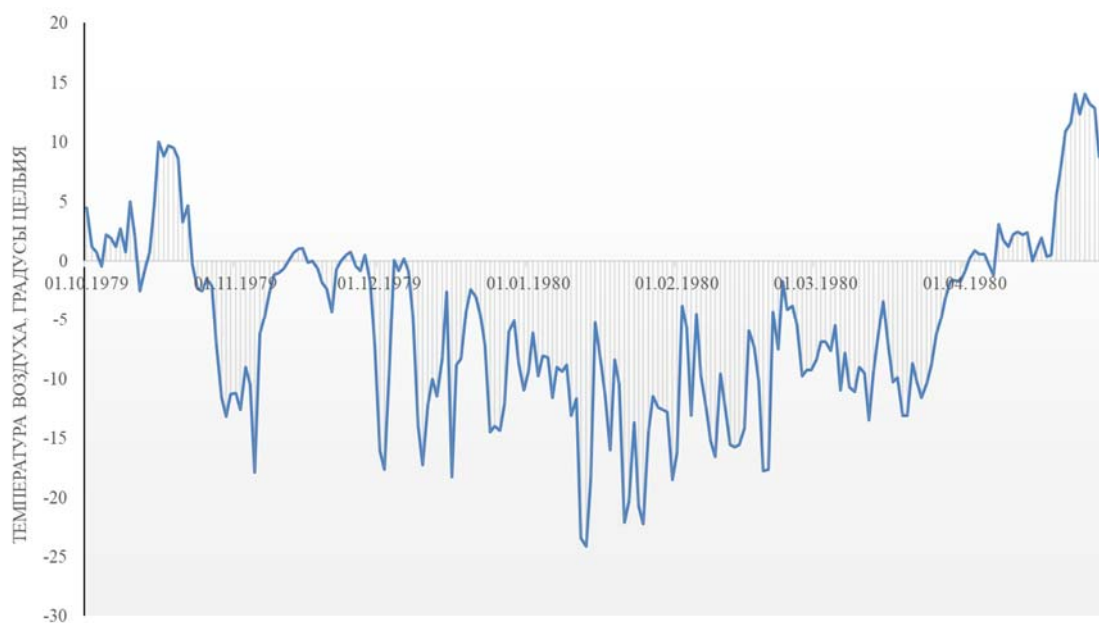


Рисунок А.8 – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1980 год



Рисунок А.9 – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1981 год

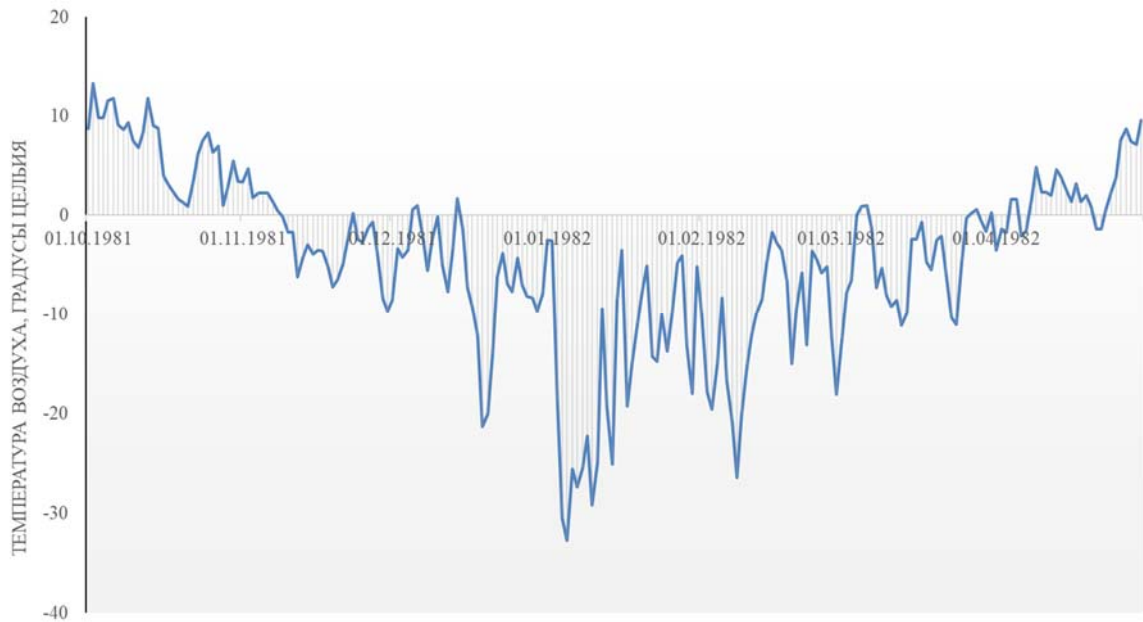


Рисунок А.10 – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1982 год

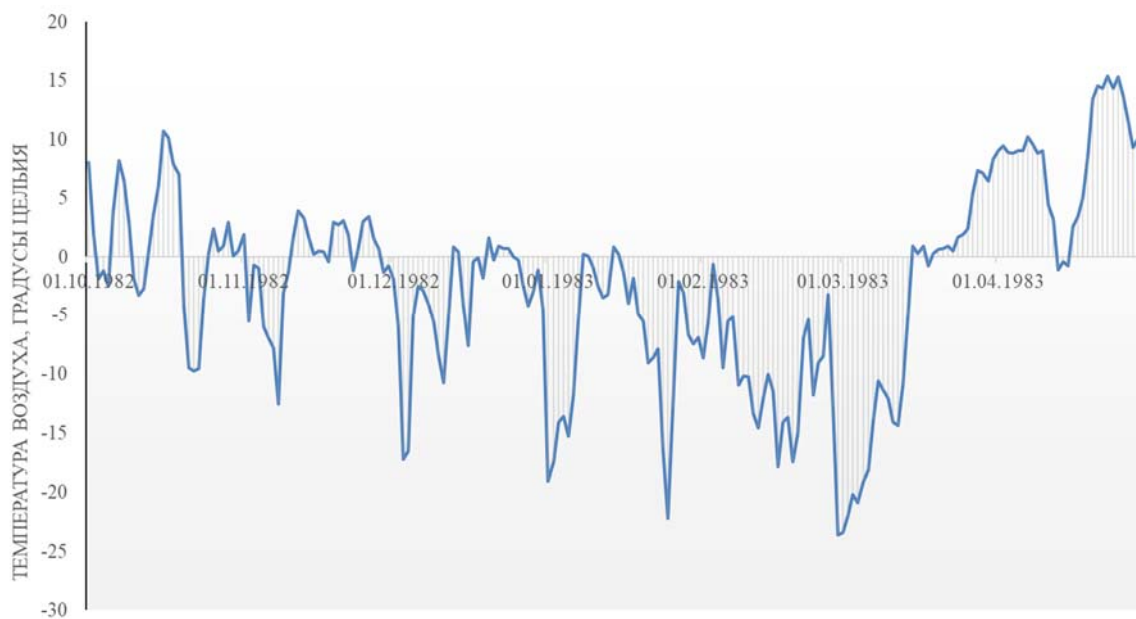


Рисунок А.11 – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1983 год

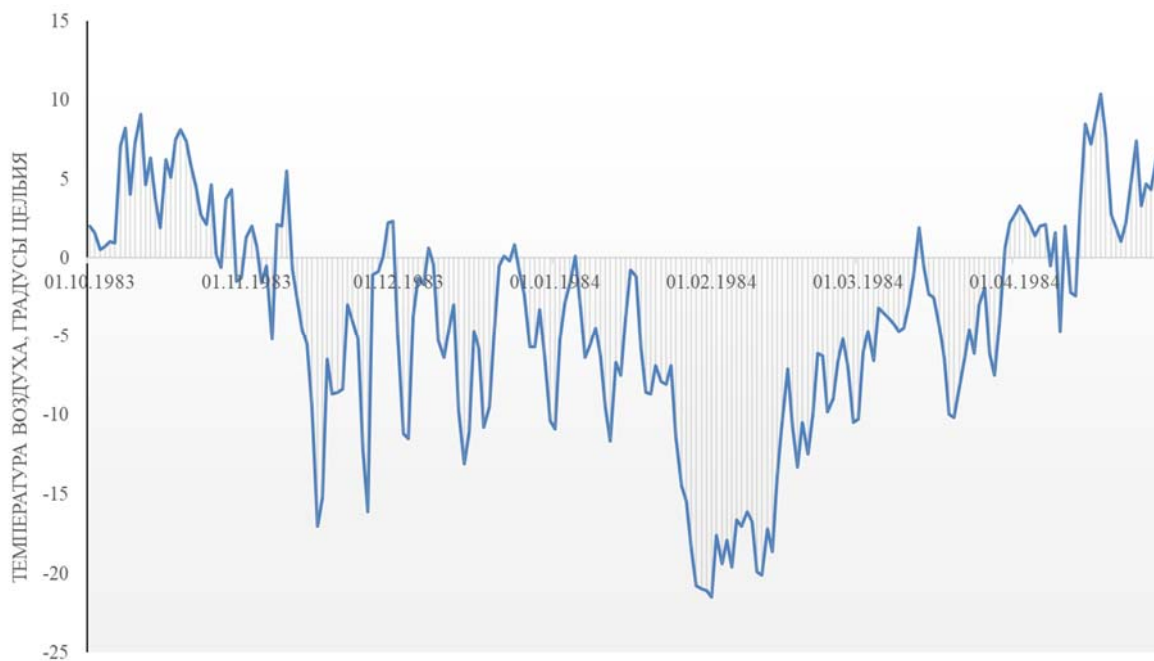


Рисунок А.12 – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1984 год



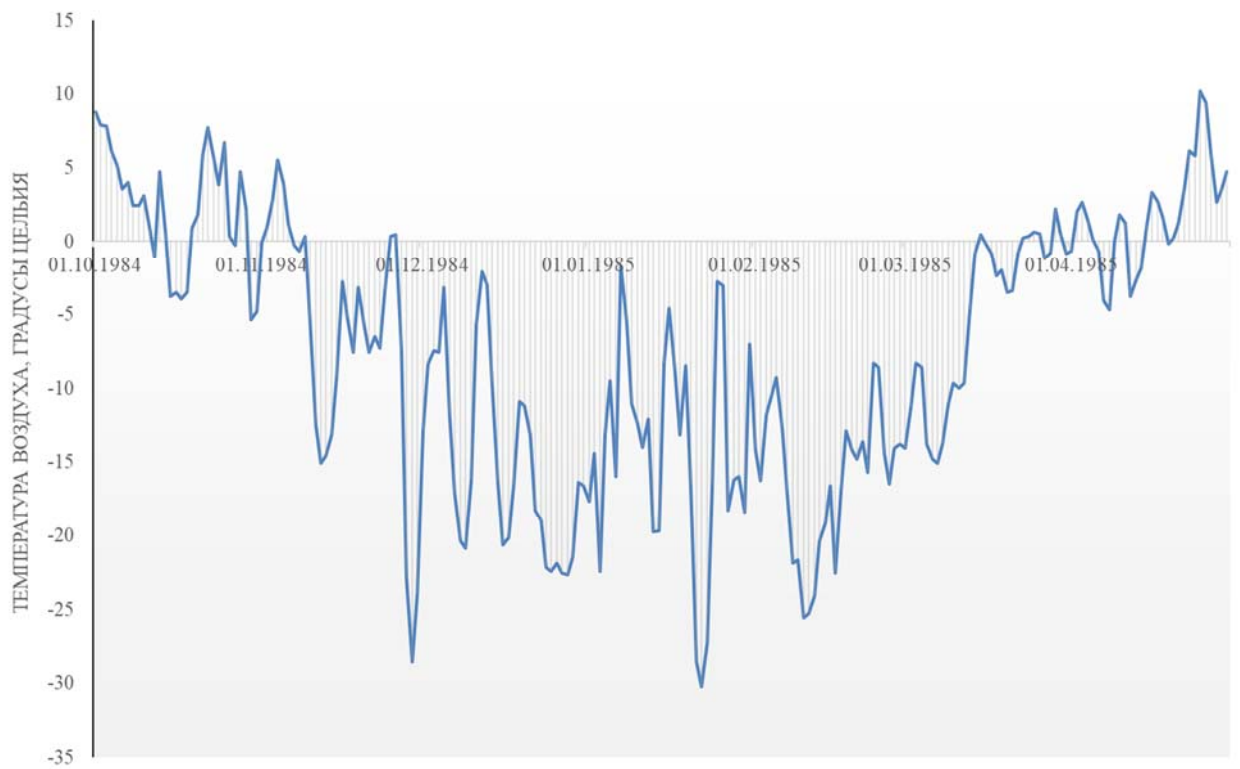


Рисунок А.13 – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1985 год

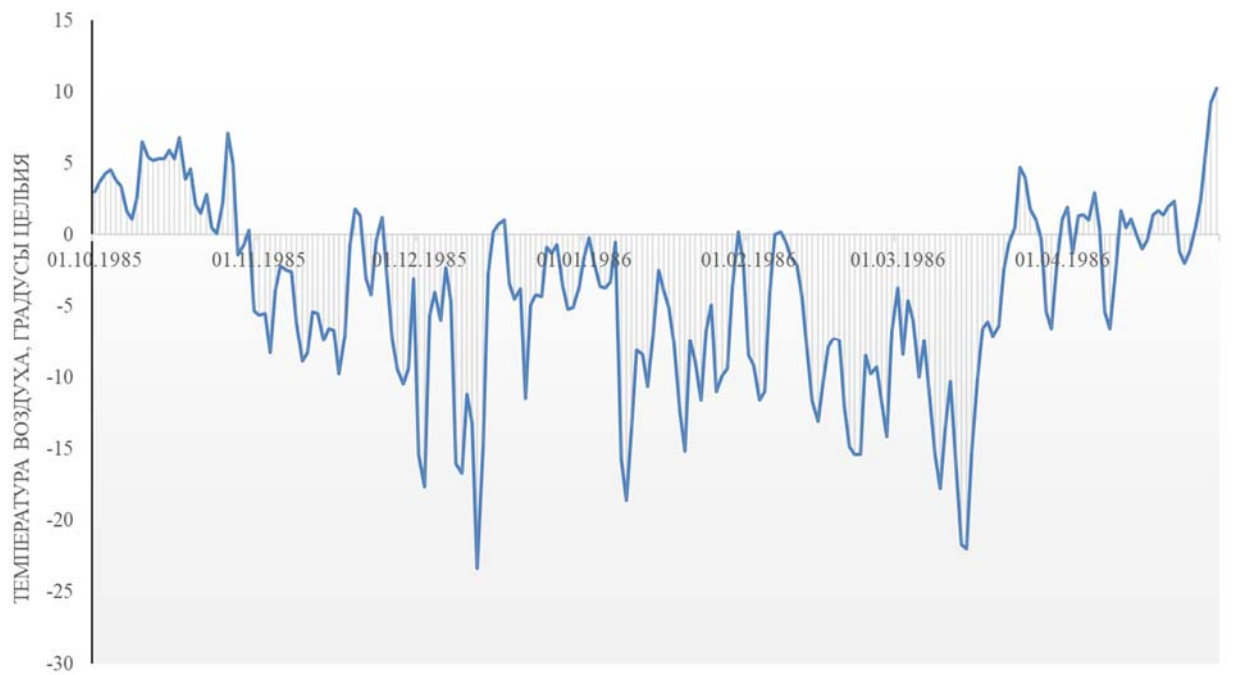


Рисунок А.14 – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1986 год

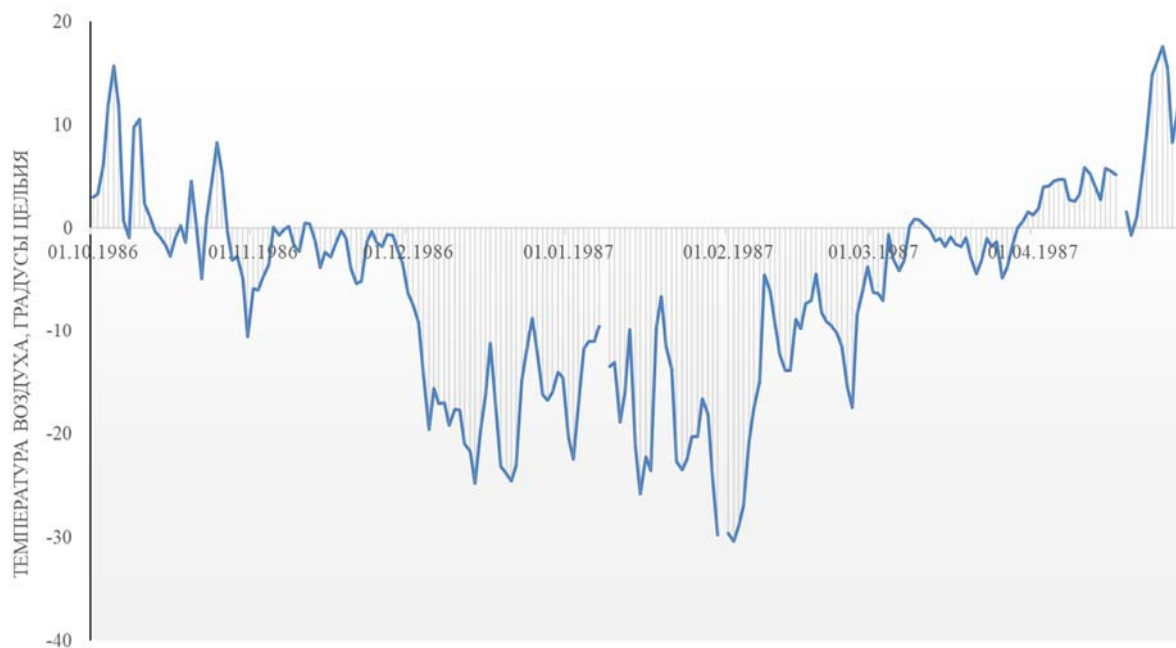


Рисунок А.15 – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1987 год

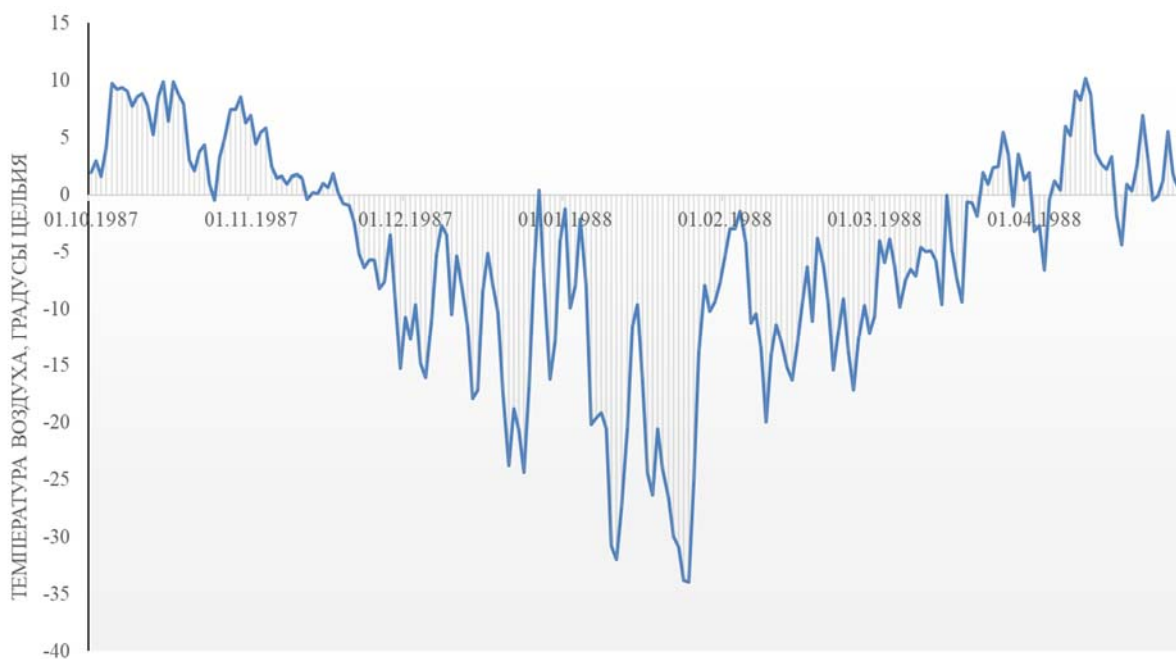


Рисунок А.16 – Ход температуры воздуха по МС Ветлуга за 1988 год

Приложение Б – Зависимости толщины льда от суммы отрицательных температур воздуха



Рисунок Б.1 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – д. Кажирово

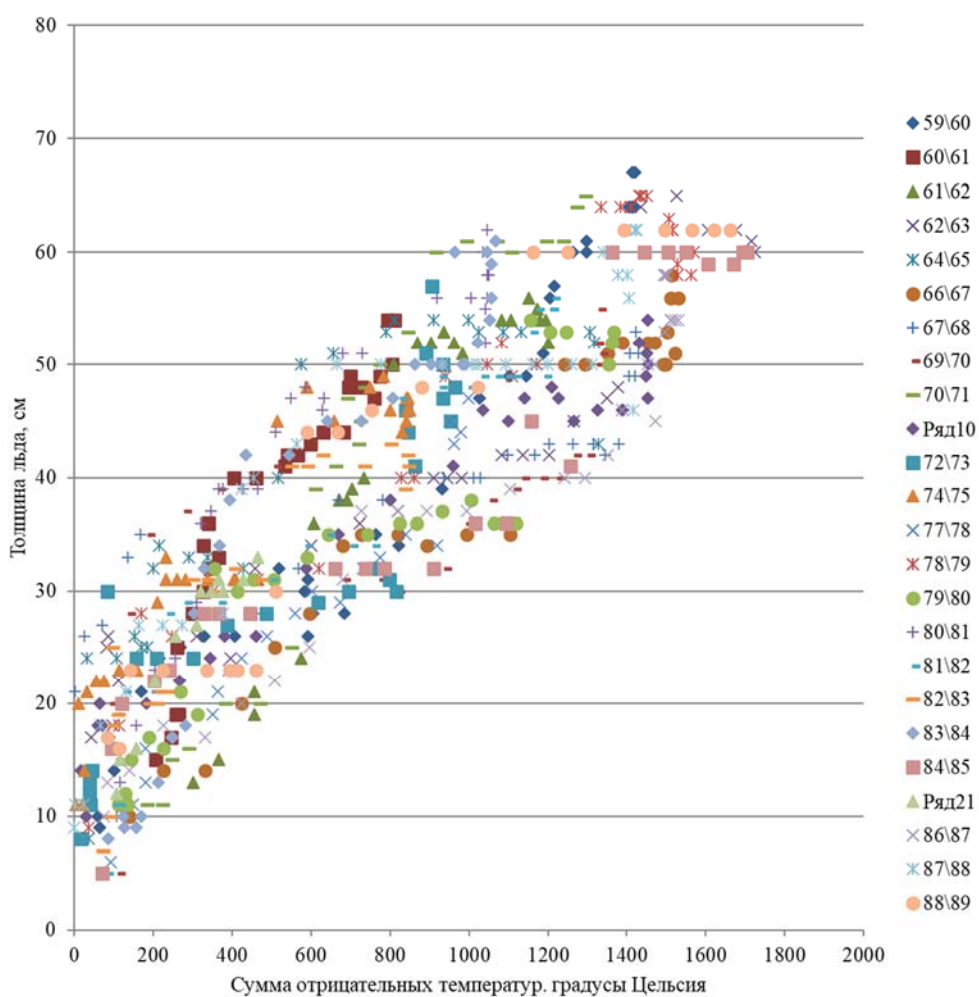


Рисунок Б.2 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – д. Кажирово (цветными маркерами выделены данные за конкретные годы)

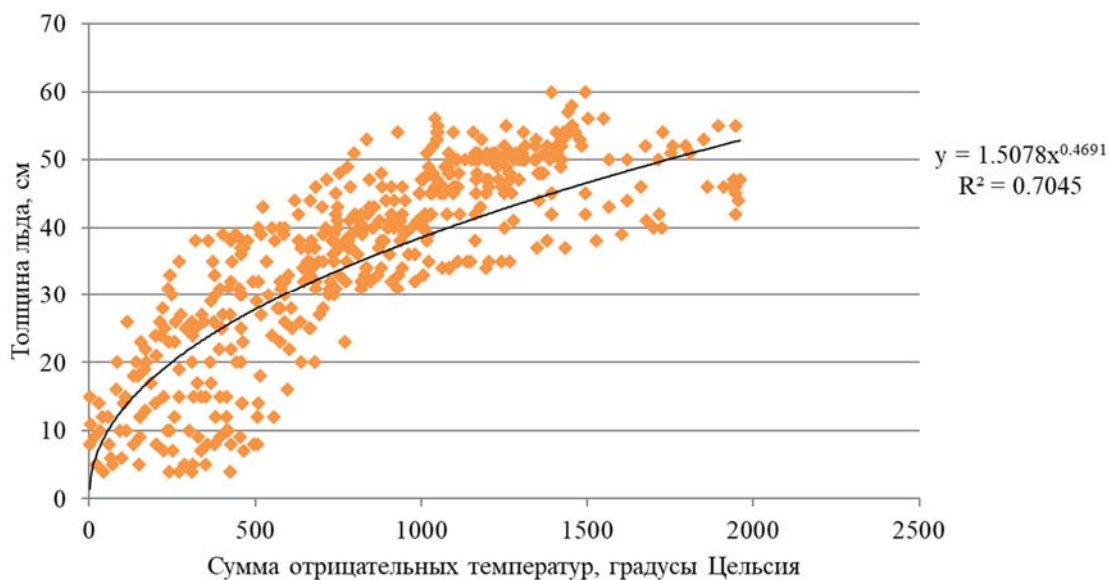


Рисунок Б.3 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – д. Михайловицы

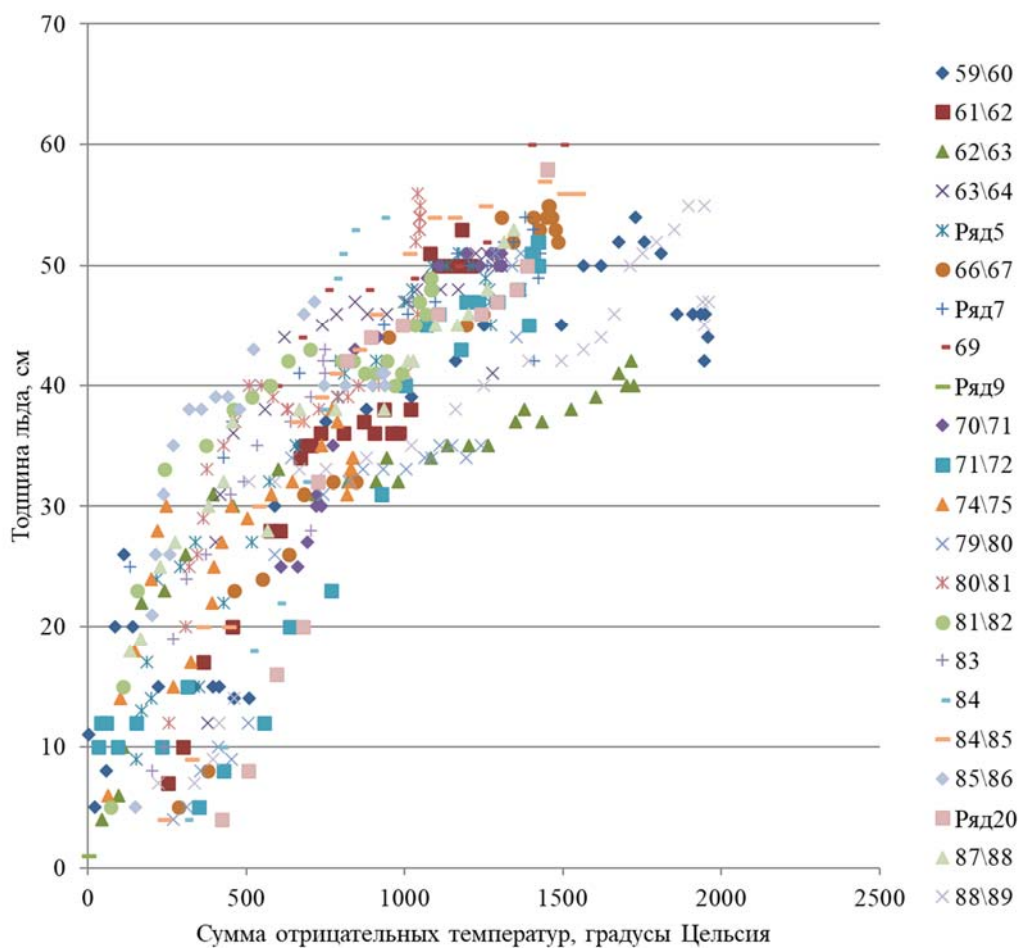


Рисунок Б.4 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – д. Михайловицы (цветными маркерами выделены данные за конкретные годы)



Рисунок Б.5 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – д. Шарья

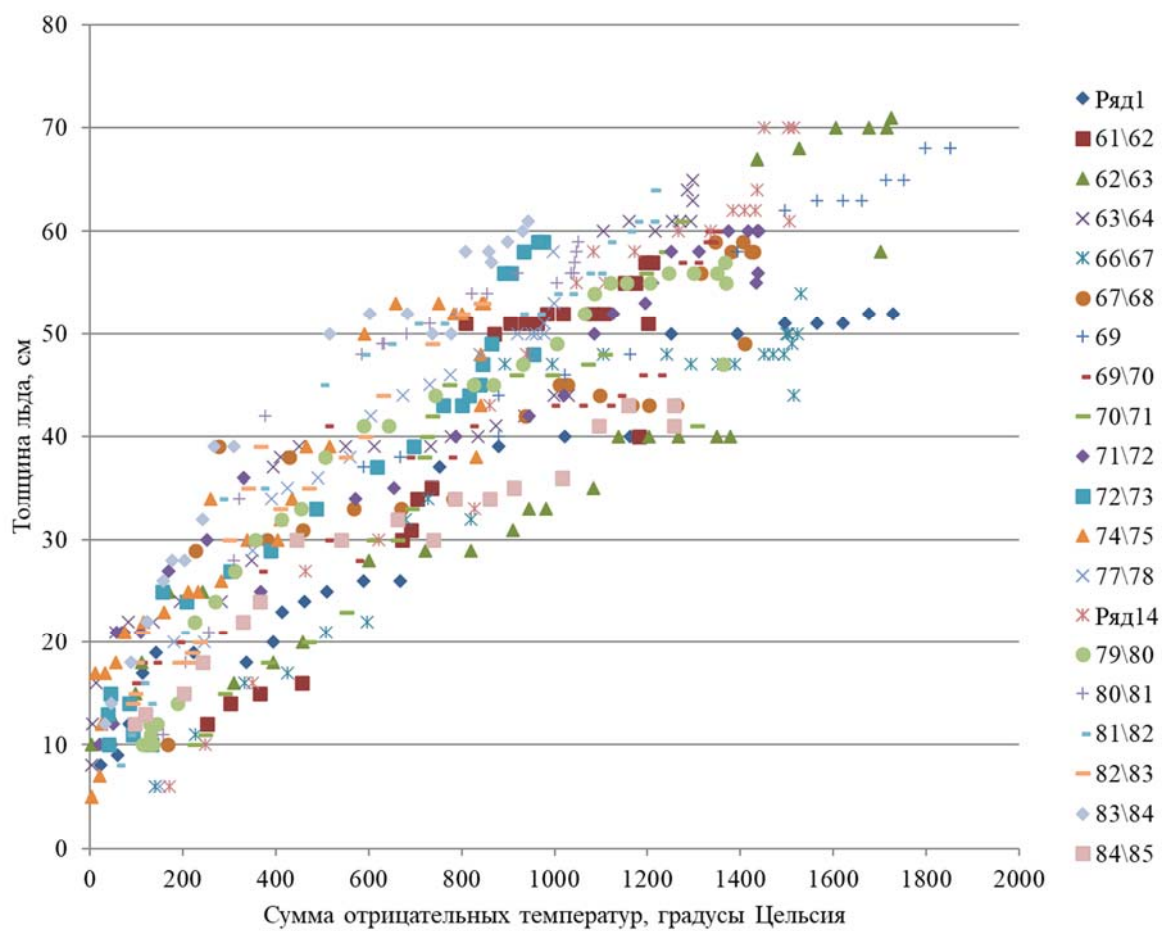


Рисунок Б.6 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – д. Шарья (цветными маркерами выделены данные за конкретные годы)



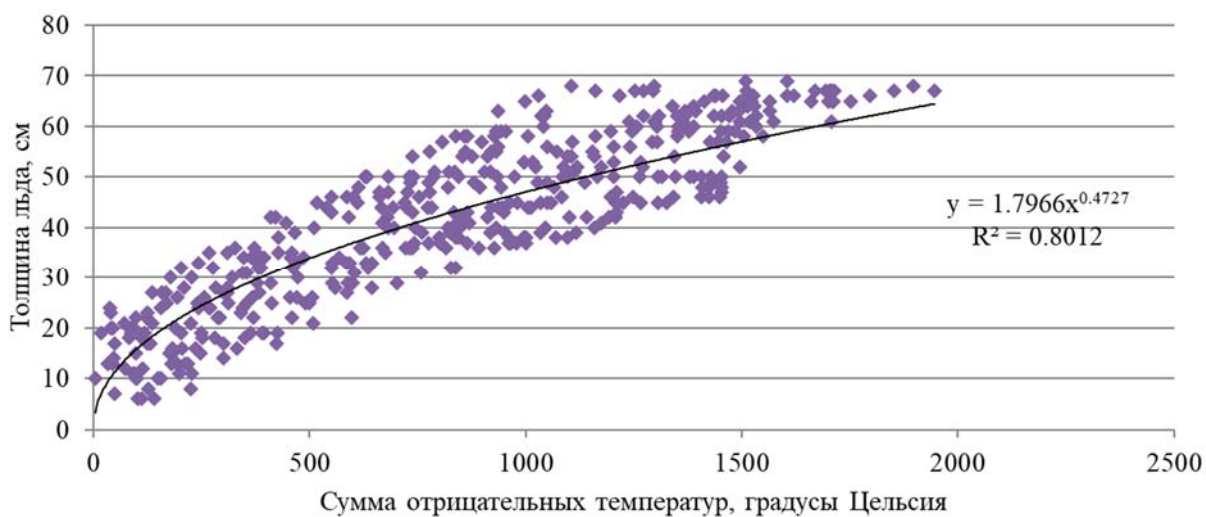


Рисунок Б.7 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – Ветлуга

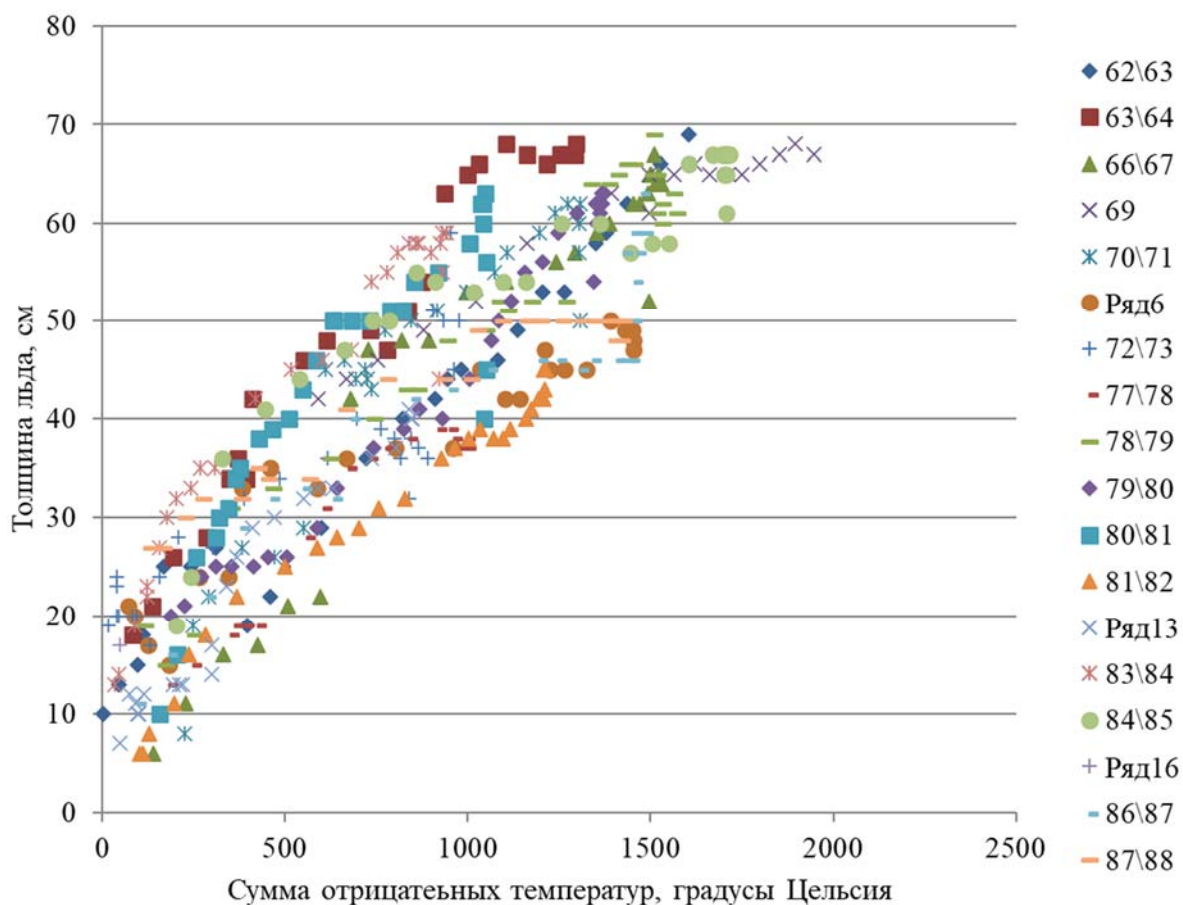


Рисунок Б.8 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – Ветлуга (цветными маркерами выделены данные за конкретные годы)

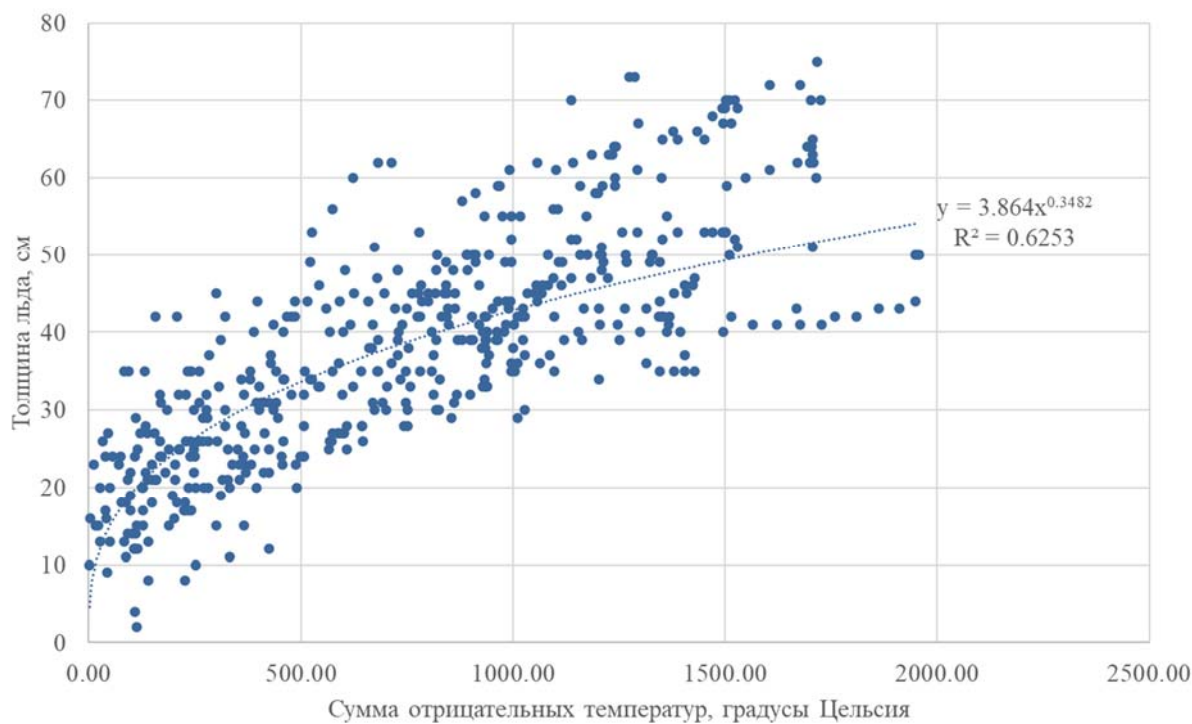


Рисунок Б.9 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – Варнавино

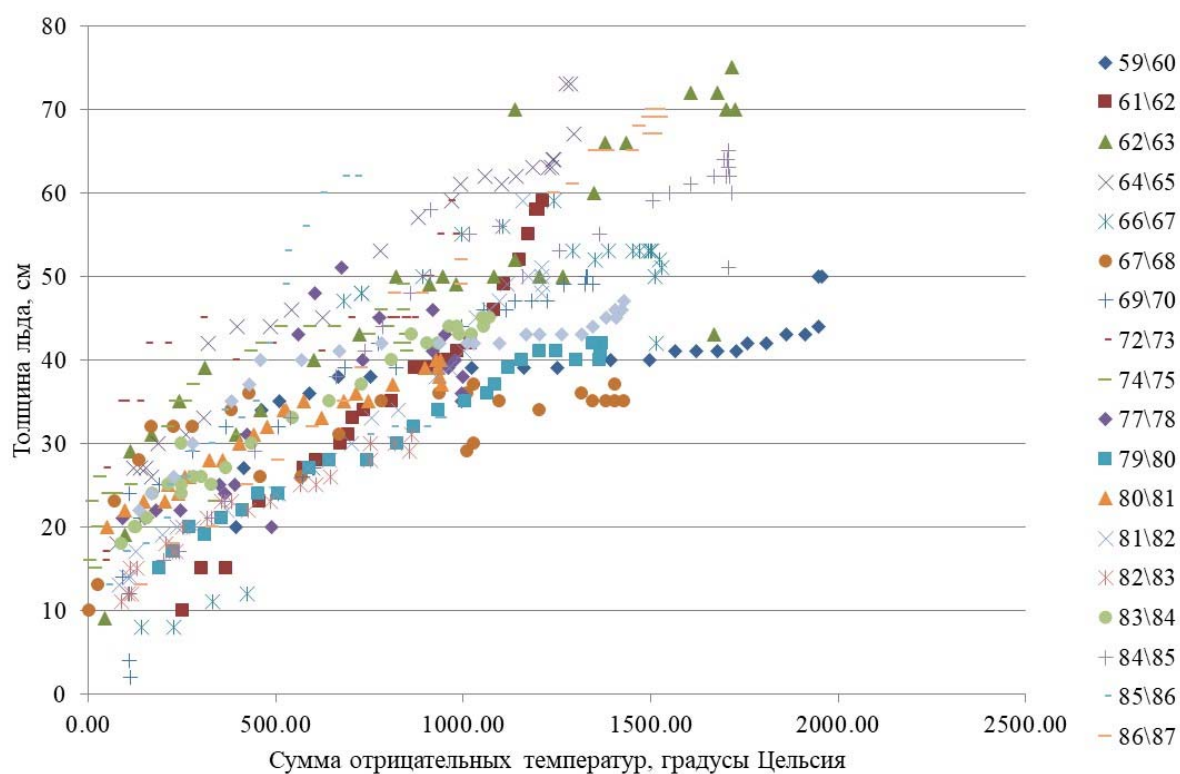


Рисунок Б.10 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – Варнавино  
(цветными маркерами выделены данные за конкретные годы)

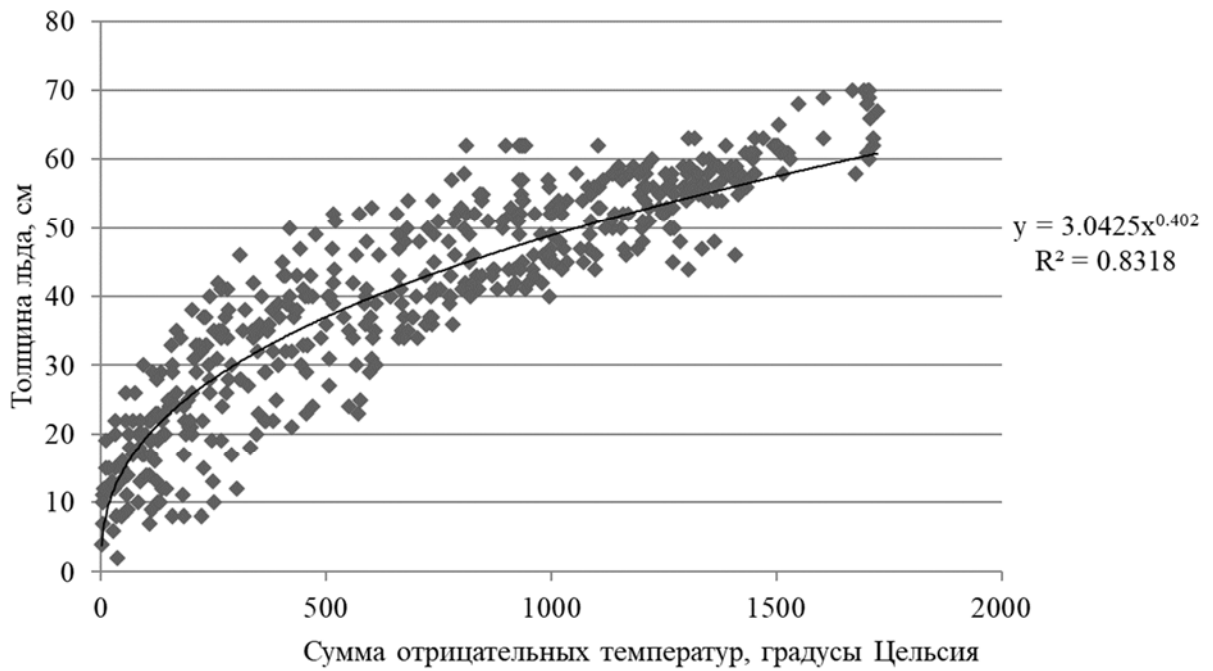


Рисунок Б.11 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – Ветлужский

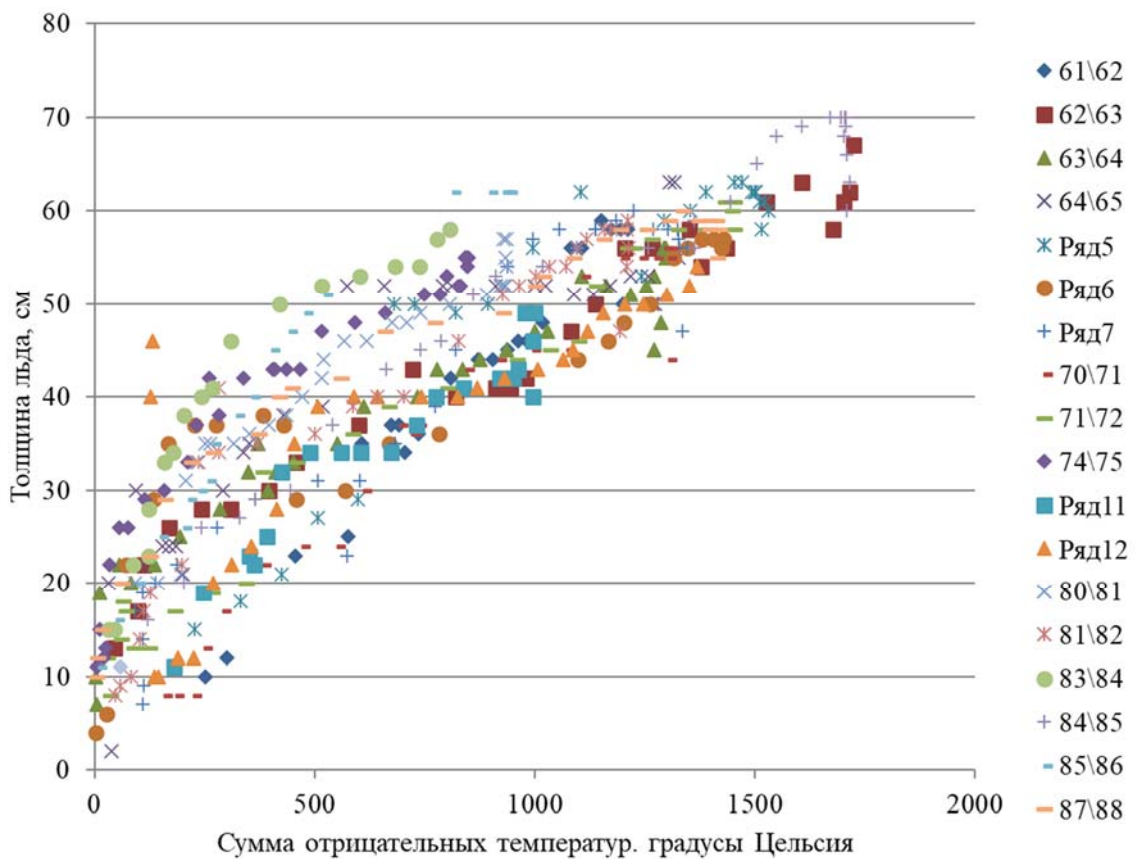


Рисунок Б.12 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – Ветлужский  
(цветными маркерами выделены данные за конкретные годы)



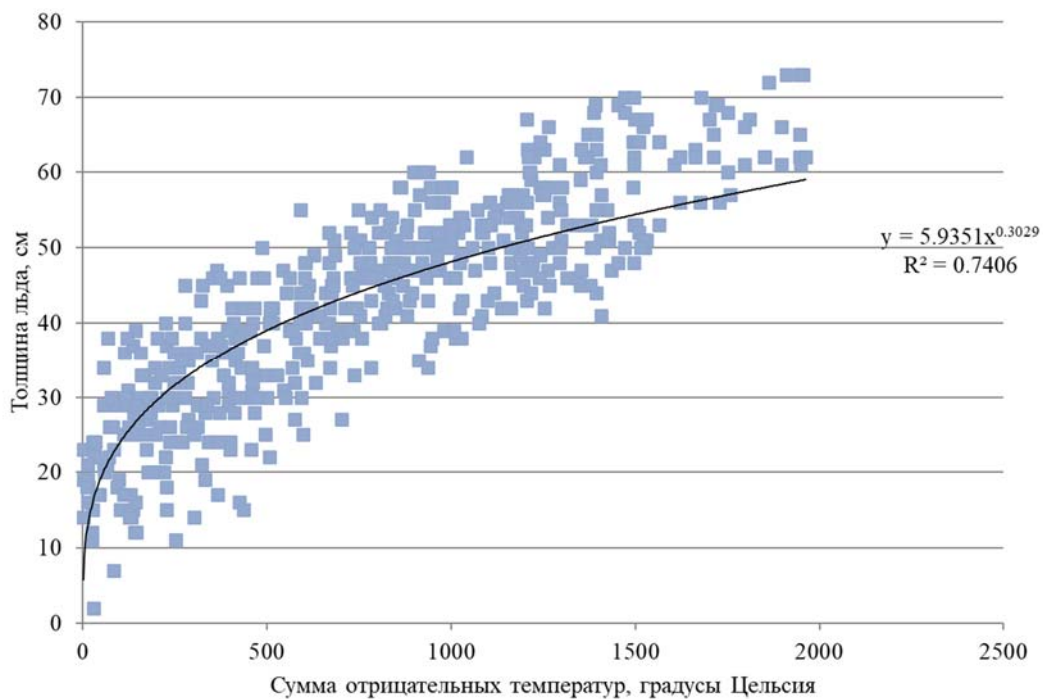


Рисунок Б.13 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – Ветлужский

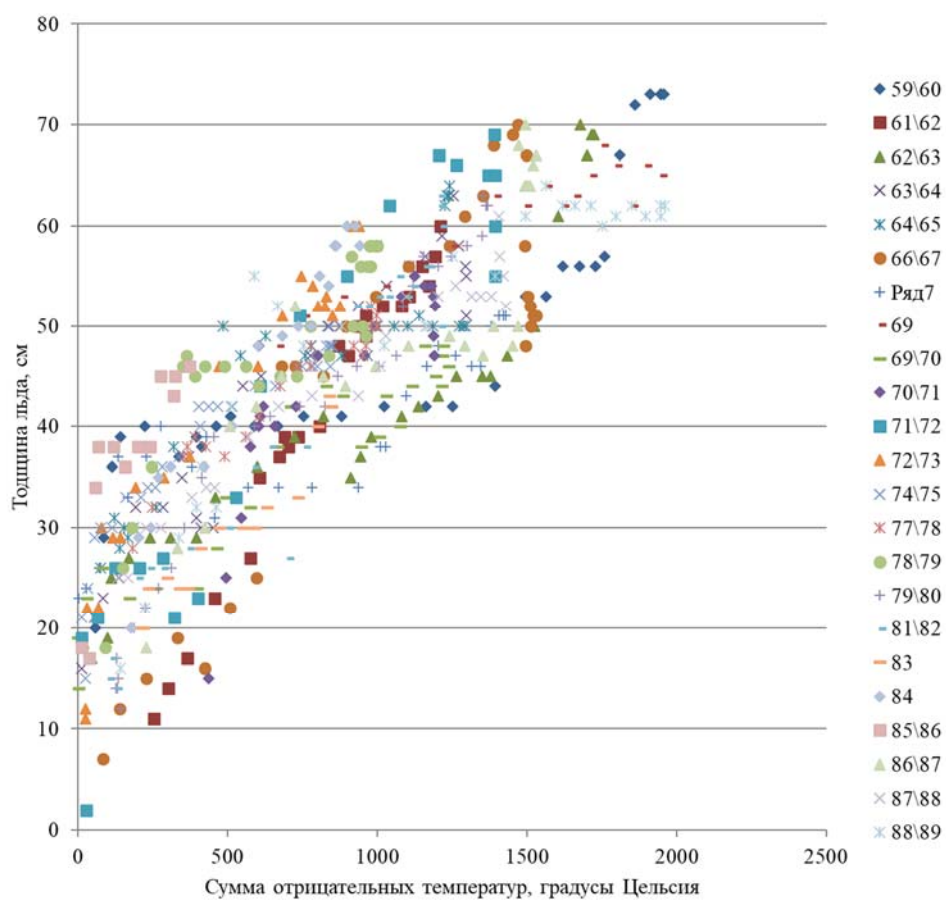


Рисунок Б.14 – Зависимость вида  $h_{л} = a (\Sigma\Theta)^m$  для р. Ветлуга – Ветлужский  
 (цветными маркерами выделены данные за конкретные годы)